

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SIMULACIÓN DE ENSAYO DE PROTECCIÓN DE PEATÓN
CON MODELOS DE ENSAYO SIMPLIFICADOS MEDIANTE
LS-DYNA

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

AUTOR:

D. DIEGO ALONSO HERNÁNDEZ

TUTORA:

Dra. Dña. BEATRIZ LÓPEZ BOADA

MAYO 2015

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1	OBJETIVO	13
1.2	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	15
2	SEGURIDAD VEHICULAR	16
2.1	SEGURIDAD ACTIVA	16
2.1.1	SISTEMA DE FRENOS	17
2.1.2	CONTROL DE TRACCIÓN (TCS)	18
2.1.3	CONTROL DE ESTABILIDAD (ESP)	18
2.1.4	CONTROL DE CRUCERO ADAPTATIVO (ACC).....	20
2.1.5	SISTEMAS DE ALUMBRADO	20
2.1.6	NEUMÁTICOS	21
2.1.7	DIRECCIÓN	21
2.1.8	SUSPENSIÓN	22
2.2	SEGURIDAD PASIVA.....	23
2.2.1	EL FENÓMENO DE COLISIÓN	23
2.2.2	CARROCERÍA Y HABITÁCULO DE SEGURIDAD	24
2.2.3	CINTURÓN DE SEGURIDAD	28
2.2.4	REPOSACABEZAS	30
2.2.5	AIRBAG	31
3	EURONCAP- ENSAYOS DE CHOQUE	33
3.1	Historia	33
3.2	Pruebas EURONCAP	34
3.2.1	Impacto frontal con solape parcial	35
3.2.2	Impacto frontal completo.....	36
3.2.3	Impacto lateral	37
3.2.4	Impacto lateral de poste.....	37
3.2.5	Latigazo cervical	38
3.2.6	AEB para ciudad e interurbano	38
3.2.7	Protección de ocupantes infantiles	39
3.2.8	Impacto en la cabeza	40
3.2.9	Impacto en la parte superior de las piernas.....	40
3.2.10	Impacto en la parte inferior de las piernas	41
3.2.11	Control electrónico de estabilidad (ESC)	41
3.2.12	Sistema de control de velocidad (SAS).....	42
3.2.13	Asistencia de cambio de carril	42

3.2.14	Recordatorio de aviso de cinturón de seguridad (SBR)	43
3.3	Valoración Euroncap	43
4	ELEMENTOS FINITOS	45
4.1	PRINCIPIOS BÁSICOS.....	46
4.2	PROBLEMAS NO LINEALES	46
4.3	LS-DYNA.....	47
5	PROTOCOLO DE ENSAYO DE PROTECCION DE PEATONES	50
5.1	Preparación del vehículo	51
5.1.1	Condiciones iniciales	51
5.1.2	Marcado del vehículo.....	51
5.2	Impactador	54
5.3	Condiciones de ensayo	55
5.4	Cálculo de los criterios de lesiones.....	55
5.5	Valoración Global euroNCAP	56
6	MODELOS DE SIMULACION	58
6.1	Vehículo	58
6.2	Modelo simplificado	60
6.2.1	Geometría.....	60
6.2.2	Materiales.....	65
6.2.3	Gravedad	65
6.2.4	Contactos	66
6.3	Impactador adulto	67
6.3.1	Geometría.....	67
6.3.2	Materiales.....	69
6.3.3	Gravedad	69
6.3.4	Acelerómetros.....	69
6.3.5	Contactos	70
6.3.6	Velocidad inicial.....	70
6.4	Impactador niño	70
6.4.1	Geometría.....	70
6.4.2	Materiales.....	73
6.4.3	Gravedad	73
6.4.4	Acelerómetros.....	73
6.4.5	Contactos	74
6.4.6	Velocidad inicial.....	74
6.5	Tipos de impacto	74
7	RESULTADOS	78

7.1	Adulto	78
7.2	Niño	87
7.3	Análisis de los resultados	95
8	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	99
8.1	Conclusiones	99
8.2	Trabajos futuros	100
9	REFERENCIAS	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución del número de muertos y heridos graves víctimas en un accidente.....	12
Figura 1.2. Evolución del porcentaje de muertos y heridos graves víctimas en un accidente.....	12
Figura 2.1. Sistema ABS.....	17
Figura 2.2. Efecto del ESP en un subviraje.....	19
Figura 2.3. Efecto del ESP en un sobreviraje.....	19
Figura 2.4. Sistema de suspensión.....	23
Figura 2.5. Carrocería autoportante.....	25
Figura 2.6. Zona de absorción de impacto trasera.....	25
Figura 2.7. Estructura con deformación programada.....	26
Figura 2.8. Esquema del cinturón de seguridad.....	28
Figura 2.9. Funcionamiento del carrete inercial.....	29
Figura 2.10. Funcionamiento del reposacabezas activo.....	30
Figura 2.11. Airbags frontales, laterales y de cortina.....	32
Figura 3.1. Impactadores usados en los test.....	35
Figura 3.2. Impacto frontal con solape parcial.....	35
Figura 3.3. Impacto frontal completo.....	36
Figura 3.4. Impacto lateral de poste.....	38
Figura 3.5. Dummies infantiles.....	39
Figura 3.6. Impacto en la parte superior de las piernas.....	40
Figura 3.7. Impacto en la parte inferior de las piernas.....	41
Figura 4.1. Gráfica tensión-deformación.....	47
Figura 4.2. Dummy implementado en LS-DYNA	48
Figura 4.3. Cinturón de seguridad en LS-DYNA.....	49
Figura 5.1. Línea de referencia lateral del capo.....	52
Figura 5.2. Wrap around distances.....	52
Figura 5.3. Wrap around lines.....	53
Figura 5.4. División del capó en sectores.....	53
Figura 5.5. Impactador con forma de cabeza de adulto.....	54
Figura 5.6. Impactador con forma de cabeza de niño.....	54
Figura 6.1. Chrysler Neon.....	58
Figura 6.2. Chrysler Neon. Vista superior.....	59
Figura 6.3. Chrysler Neon. Vista lateral.....	59

Figura 6.4. Chrysler Neon. Vista frontal.....	59
Figura 6.5. Modelo simplificado.....	60
Figura 6.6. Modelo simplificado. Aleta derecha.....	61
Figura 6.7. Modelo simplificado. Pieza interior del capó.....	61
Figura 6.8. Modelo simplificado. Pieza exterior del capó.....	61
Figura 6.9. Modelo simplificado. Aleta izquierda.....	62
Figura 6.10. Modelo simplificado. Lateral derecho.....	62
Figura 6.11. Modelo simplificado. Lateral izquierdo.....	62
Figura 6.12. Modelo simplificado. Parabrisas.....	63
Figura 6.13. Modelo simplificado. Capó completo con aleta izquierda.....	63
Figura 6.14. Modelo simplificado. Capó completo con aleta derecha.....	64
Figura 6.15. Modelo simplificado. Parabrisas con lateral derecho.....	64
Figura 6.16. Modelo simplificado. Parabrisas con lateral izquierdo.....	64
Figura 6.17. Ejemplo de fijaciones en los nodos.....	66
Figura 6.18. Dimensiones impactador adulto.....	67
Figura 6.19. Impactador adulto completo.....	68
Figura 6.20. Base impactador adulto.....	68
Figura 6.21. Núcleo impactador adulto.....	68
Figura 6.22. Piel impactador adulto.....	69
Figura 6.23. Dimensiones impactador niño.....	71
Figura 6.24. Impactador niño.....	71
Figura 6.25. Base impactador niño.....	72
Figura 6.26. Núcleo impactador niño.....	72
Figura 6.27. Piel impactador niño.....	72
Figura 6.28. Impacto impactador adulto con parabrisas.....	75
Figura 6.29. Impacto impactador adulto con parabrisas y lateral derecho.....	75
Figura 6.30. Impacto impactador adulto con parabrisas y lateral izquierdo.....	76
Figura 6.31. Impacto impactador niño con capó.....	76
Figura 6.32. Impacto impactador niño con capó y aleta derecha.....	76
Figura 6.33. Impacto impactador niño con capó y aleta izquierda.....	77
Figura 7.1. Impacto adulto 1A.....	78
Figura 7.2. Impacto adulto 1B.....	79
Figura 7.3. Impacto adulto 1C.....	79
Figura 7.4. Impacto adulto 1D.....	79
Figura 7.5. Impacto adulto 2A.....	80
Figura 7.6. Impacto adulto 2B.....	80
Figura 7.7. Impacto adulto 2C.....	80

Figura 7.8. Impacto adulto 2D.....	81
Figura 7.9. Impacto adulto 3A.....	81
Figura 7.10. Impacto adulto 3B.....	81
Figura 7.11. Impacto adulto 3C.....	82
Figura 7.12. Impacto adulto 3D.....	82
Figura 7.13. Impacto adulto 4A.....	82
Figura 7.14. Impacto adulto 4B.....	83
Figura 7.15. Impacto adulto 4C.....	83
Figura 7.16. Impacto adulto 4D.....	83
Figura 7.17. Impacto adulto 5A.....	84
Figura 7.18. Impacto adulto 5B.....	84
Figura 7.19. Impacto adulto 5C.....	84
Figura 7.20. Impacto adulto 5D.....	85
Figura 7.21. Impacto adulto 6A.....	85
Figura 7.22. Impacto adulto 6B.....	85
Figura 7.23. Impacto adulto 6C.....	86
Figura 7.24. Impacto adulto 6D.....	86
Figura 7.25. Impacto niño 1A.....	87
Figura 7.26. Impacto niño 1B.....	87
Figura 7.27. Impacto niño 1C.....	88
Figura 7.28. Impacto niño 1D.....	88
Figura 7.29. Impacto niño 2A.....	88
Figura 7.30. Impacto niño 2B.....	89
Figura 7.31. Impacto niño 2C.....	89
Figura 7.32. Impacto niño 2D.....	89
Figura 7.33. Impacto niño 3A.....	90
Figura 7.34. Impacto niño 3B.....	90
Figura 7.35. Impacto niño 3C.....	90
Figura 7.36. Impacto niño 3D.....	91
Figura 7.37. Impacto niño 4A.....	91
Figura 7.38. Impacto niño 4B.....	91
Figura 7.39. Impacto niño 4C.....	92
Figura 7.40. Impacto niño 4D.....	92
Figura 7.41. Impacto niño 5A.....	92
Figura 7.42. Impacto niño 5B.....	93
Figura 7.43. Impacto niño 5C.....	93
Figura 7.44. Impacto niño 5D.....	93

Figura 7.45. Impacto niño 6A.....	94
Figura 7.46. Impacto niño 6B.....	94
Figura 7.47. Impacto niño 6C.....	94
Figura 7.48. Impacto niño 6D.....	95
Figura 7.49. Distribución de resultados sobre el capó y parabrisas.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Evolución del número de peatones víctimas en un accidente.....	11
Tabla 5.1. Clasificación AIS.....	56
Tabla 5.2. Valoración euroNCAP.....	56
Tabla 5.3. Asignación colores y puntos euroNCAP.....	56
Tabla 6.1. Tabla de materiales del modelo de automóvil ensayado.....	65
Tabla 6.2. Tabla de materiales impactador adulto.....	69
Tabla 6.3. Tabla de materiales impactador niño.....	72
Tabla 6.4. Piezas utilizadas en cada simulación.....	74
Tabla 7.1. Valores HIC.....	95
Tabla 7.2. Resultados HIC adulto posicionados.....	96
Tabla 7.3. Resultados HIC niño posicionados.....	96
Tabla 7.4. Valoración HIC adulto.....	97
Tabla 7.5. Valoración HIC niño.....	97

1 INTRODUCCIÓN

En el año 2013, 12.344 peatones fueron víctimas de un accidente en vías urbanas o interurbanas en España.

En la tabla 1.1 se muestra la evolución temporal del número de peatones víctimas de un accidente, en las últimas dos décadas.

Tabla 1.1: Evolución del número de peatones víctimas en un accidente

	Total	Muertos	Heridos graves	Heridos leves
1993	14.000	1.104	5.028	7.868
1994	13.981	1.008	4.856	8.117
1995	13.925	1.000	4.738	8.187
1996	13.949	960	4.439	8.550
1997	13.744	967	4.239	8.538
1998	13.903	995	3.921	8.987
1999	13.122	906	3.515	8.701
2000	13.498	898	3.288	9.312
2001	13.058	846	2.907	9.305
2002	12.904	776	2.844	9.284
2003	12.602	787	2.767	9.048
2004	12.121	683	2.715	8.723
2005	11.624	680	2.626	8.318
2006	11.766	613	2.459	8.694
2007	11.429	591	2.312	8.526
2008	11.146	502	2.062	8.582

2009	10.887	470	1.953	8.464
2010	10.923	471	1.959	8.493
2011	11.245	380	1.916	8.949
2012	11.151	376	1.916	8.859
2013	12.344	378	2.053	9.913

En las figuras 1.1 y 1.2 se observa la evolución de temporal del número de muertos y heridos graves en accidentes de este tipo.

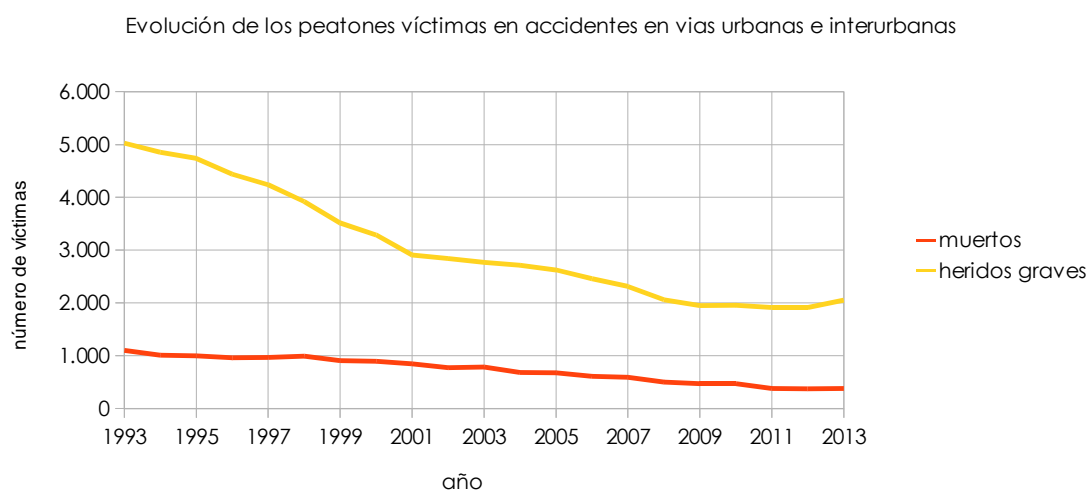


Figura 1.1. Evolución del número de muertos y heridos graves víctimas en un accidente

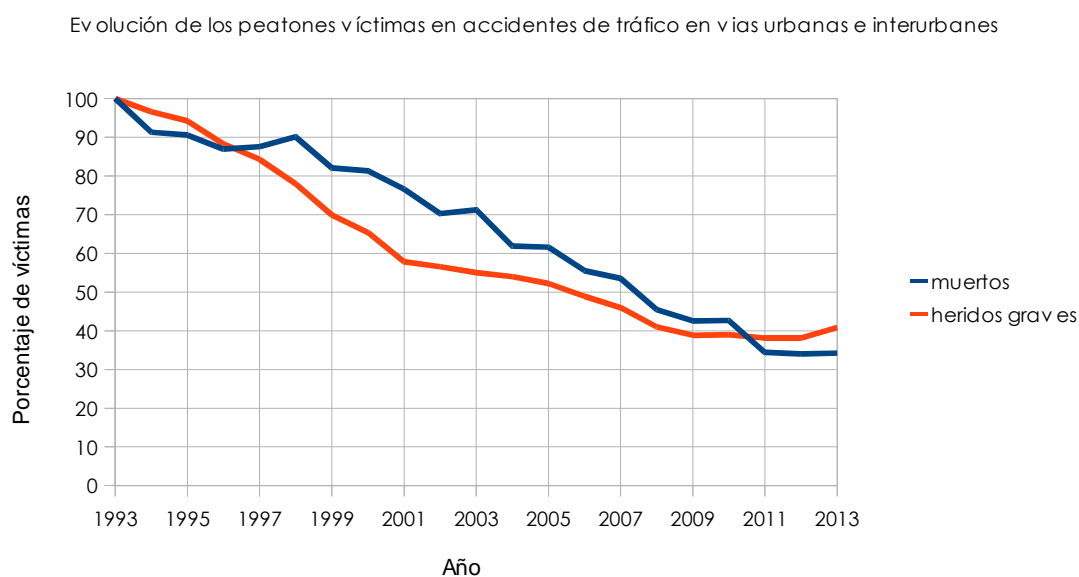


Figura 1.2. Evolución del porcentaje de muertos y heridos graves víctimas en un accidente.

Estos datos han sido obtenidos del Anuario estadístico de accidentes de 2013 publicado por la Dirección General de Tráfico (DGT) [1].

Examinando la tabla 1.1 y las figuras 1.1 y 1.2, se puede apreciar un leve descenso en el número de víctimas, aunque con un repunte en los últimos cinco años. El dato positivo se puede obtener al apreciar un significativo descenso de los heridos graves y muertos en este tipo de accidentes, reduciendo al 34% el número de muertos y al 41% el número de heridos graves.

El hecho de que se produzca un descenso tan pronunciado en el número de muertos y heridos leves, a la vez que el número de víctimas totales desciende de manera mucho más contenida, está relacionado en gran medida con la actualización del parque automovilístico en España. La introducción de nuevos vehículos con elementos de seguridad mejorados, los sistemas de protección al peatón en caso de atropello, y en definitiva el estudio e implementación de nuevos sistemas de seguridad enfocados a la minimización de las lesiones a los peatones, son responsables de esta reducción tan significativa de la gravedad de los accidentes que involucran a los peatones.

1.1 OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es desarrollar una serie de simulaciones que reflejen fielmente los ensayos realizados por el consorcio euroNCAP [2] con respecto a la protección de peatones, más concretamente con el test de impacto en la cabeza. Se ha desarrollado el ensayo completo, tanto para adulto como para niño.

Se han realizado tantas simulaciones como indica el protocolo de ensayo correspondiente desarrollado por EURONCAP, definiendo en cada una de ellas, el punto de impacto, velocidad, contacto, etc. [3].

Para este fin, se ha utilizado el programa informático LS-DYNA para los desarrollos los cálculos de cada una de las simulaciones. Para definir las condiciones iniciales de cada uno de los ensayos, tales como condiciones de contorno, velocidades, contactos, etc., así como el posterior análisis de los resultados obtenidos se ha utilizado el programa LS-PREPOST. Ambos programas han sido desarrollados por Livermore Software Technology Corporation (LSTC) [4].

Como elemento diferencial de este proyecto, se ha intentado reducir al mínimo los modelos empleados en las simulaciones, reduciendo el modelo del automóvil elegido, al menor número de piezas posible, de manera que se puedan conseguir modelos más sencillos para desarrollar las simulaciones. Para ello, en cada simulación de impacto se emplea un modelo diferente, consistente en las piezas del automóvil que entran en contacto directo con el impactador, ya sea el parabrisas, el capó, o los laterales del automóvil. Esto se hace con el fin de simplificar y optimizar los procesos desarrollados para cada simulación, haciendo más sencillo y eficiente, tanto el trabajo de los ingenieros encargados de desarrollarlas, como de la propia herramienta informática en sí, ya que los resultados que se pretender obtener en el ensayo de protección de peatones, corresponden a las aceleraciones que sufre el impactador, y no a las tensiones, deformaciones o desplazamientos que sufre el vehículo.

Destacar que el modelo de automóvil que se ha utilizado ha sido desarrollado por NCAC (National Crash Analysis Center) [18], y ha sido obtenido de su página web. Los modelos de impactadores utilizados se han desarrollado de acuerdo al informe del grupo 17 de la EEVC (European Enhanced Vehicle-safety Committee Working Group 17 Report) [17].

Cabe destacar que todos los protocolos y documentación técnica mencionados y utilizados en este proyecto, son los que estaban en vigor en la fecha de comienzo de este proyecto. Algunos de ellos han sido posteriormente modificados, hecho que carece de relevancia para este proyecto, ya que el objetivo de este proyecto no es la actualización de la documentación, si no la reproducción fiel de un ensayo de protección al peatón, y sus posibles desarrollos y variaciones posteriores, independientemente de los pormenores del ensayo.

1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El presente proyecto está dividido en distintos capítulos cuyo contenido se resume a continuación.

En el primer capítulo hace una breve introducción y se determinan los objetivos del proyecto. Así mismo se determina la estructura del proyecto.

En el segundo capítulo, SEGURIDAD VEHICULAR, se explican brevemente los principales elementos de seguridad activa y pasiva que integran los vehículos.

En el tercer capítulo, EURONCAP-ENSAYOS DE CHOQUE, se hace una reseña de la organización euroNCAP, así como un breve resumen de los diferentes ensayos realizados por esta entidad para analizar la seguridad de los automóviles.

En el cuarto capítulo, ELEMENTOS FINITOS, se explica brevemente el método de los elementos finitos, que es el que emplea los programas informáticos utilizados en este proyecto.

El quinto, PROTOCOLO DE ENSAYO DE PROTECCION DE PEATONES, se centra en el protocolo empleado en estos ensayos, y que serán los que se definan las condiciones en las que se desarrollan las diferentes simulaciones de este proyecto. También se detallan los criterios de evaluación de los resultados obtenidos en los ensayos.

El sexto capítulo, MODELOS DE SIMULACIÓN, trata de los modelos utilizados en las simulaciones, tanto los modelos de vehículo, como los de los impactadores. Se detallan geometría, materiales y contactos de cada uno de los elementos que componen la simulación. También quedan aquí definidos los modelos simplificados.

En el séptimo capítulo, RESULTADOS, se recogen, se resumen y se analizan los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones.

En el octavo capítulo, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se extraen las conclusiones que se obtienen del análisis de los resultados y se analiza la validez, de los modelos empleados. Así mismo se proponen nuevos trabajos e investigaciones en función de los resultados obtenidos.

2 SEGURIDAD VEHICULAR

La seguridad vehicular es el conjunto de sistemas orientado a evitar el mayor número de accidentes posible, así como de minimizar los daños producidos, tanto materiales como personales, en el caso de que llegase a producirse el siniestro.

Con el paso de los años, los coches cada vez ofrecen más prestaciones, en cuanto a velocidad, aceleración, potencia, etc. De la misma manera las vías de circulación urbanas e interurbanas, también han sido muy mejoradas, ofreciendo año a año, mejores firmes, peraltes y señalizaciones. Esta evolución en las prestaciones de los automóviles y vías, hace necesario el desarrollo en paralelo de mejores sistemas de seguridad, evitando accidentes y minimizando los daños tanto a los ocupantes del vehículo como al resto de los usuarios de las vías, en unas condiciones, por ejemplo de velocidad, impensables hace unos años. [5]

2.1 SEGURIDAD ACTIVA

Dentro de la seguridad vehicular, la seguridad activa es el conjunto de sistemas encargado de evitar que se produzca el accidente. Este tipo de sistemas requieren la interacción con el conductor, ya que éste debe intervenir en factores como la iluminación, frenada, etc.

A continuación se describen los principales sistemas destinados a este fin.

2.1.1 SISTEMA DE FRENOS

Sistema fundamental para el funcionamiento del automóvil, ya que se encarga de adecuar la velocidad a la que se circula, así como de detener el vehículo en caso de que sea necesario. Existen varios sistemas de ayuda a la frenada que se describen a continuación:

- SISTEMA ANTIBLOQUEO DE FRENOS (ABS):

En una frenada de emergencia, el ABS (Anti-lock Braking System) modula la presión sobre los frenos en las distintas ruedas disminuyéndola, manteniéndola o aumentándola sucesivamente evitando el bloqueo de las ruedas, que puede significar la pérdida de control direccional o la pérdida de estabilidad, ya que en una rueda bloqueada, la adherencia es prácticamente nula. El esquema del sistema ABS se representa en la figura 2.1

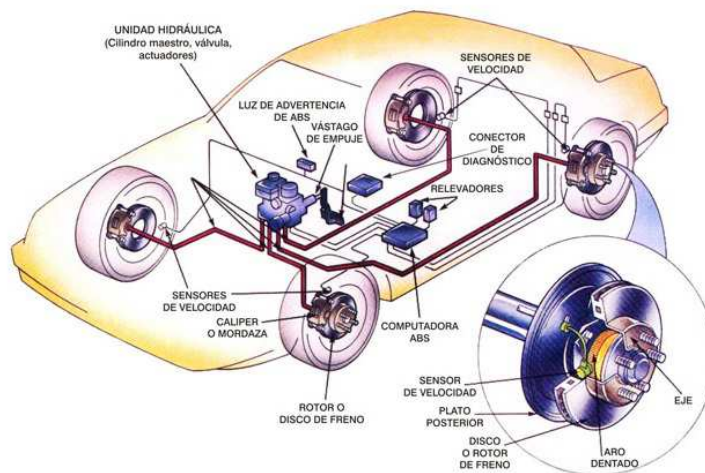


Figura 2.1. Sistema ABS

El sistema dispone de unos sensores de velocidad de giro en las ruedas, que permiten conocer en todo momento la velocidad y aceleración angular de cada rueda, lo que le permite saber en qué momento, la rueda está más próxima a la situación de bloqueo [6].

- **SISTEMA DE ASISTENCIA A LA FRENADA (BAS)**

El BAS (Brake Assist System) se trata de un complemento al ABS, que proporciona al sistema de frenos la mayor potencia disponible ante una frenada de emergencia. El sistema se desactiva completamente al dejar de accionar el freno.

- **REPARTO ELECTRÓNICO DE FRENADA (EDB)**

El EDB (Electronic Brakeforce Distribution), es un sistema antibloqueo de cuatro canales, que distribuye la fuerza de frenado entre el eje delantero y el trasero. Esta distribución de fuerzas se hace necesaria por la transferencia de masas que se produce en el vehículo en una situación de frenado de emergencia.

2.1.2 CONTROL DE TRACCIÓN (TCS)

El TCS (Traction Control System), evita el deslizamiento de las ruedas que puede producirse al realizar una aceleración brusca. Se evita de esta manera la pérdida de control en la dirección del vehículo. Este sistema se sirve de los sensores del ABS para detectar una pérdida de adherencia en las ruedas motrices. El Diferencial Autoblocante Electrónico actúa sobre los frenos de la rueda que está deslizando, transfiriendo la potencia del motor a la rueda que sí tiene adherencia.

En el caso de que ambas ruedas motrices perdiesen adherencia y comenzasen a deslizar, el Control de Tracción limita la potencia que proporciona el motor, disminuyendo la velocidad de giro de las ruedas hasta conseguir una completa adherencia al firme.

2.1.3 CONTROL DE ESTABILIDAD (ESP)

El ESP (Electronic Stability Program) es el sistema que se usa para evitar posibles sobrevirajes o subvirajes al variar la trayectoria del vehículo. Este sistema también se vale de los sensores del ABS, para realizar su función. El sistema analiza los datos que le

proporcionan los sensores de velocidad en cada rueda, aceleración lateral y rotación del vehículo, y los compara con la rotación del volante, que es la que el conductor trata de imponer.

En una situación de subviraje, el vehículo tiende a seguir la trayectoria recta. El ESP compara el giro del vehículo con el del volante, y si no coinciden, actúa sobre el freno de la rueda trasera interior, con lo que se consigue la corrección de la trayectoria, adaptándola a la que marca el conductor. En la figura 2.2 se muestra el efecto del ESP cuando el vehículo sufre un subviraje.



Figura 2.2. Efecto del ESP en un subviraje

En una situación de sobreviraje, como la que se muestra en la figura 2.3, el vehículo tiende a girar en exceso. En este caso, el sistema detecta que los giros del vehículo y del volante no corresponden, por lo que actúa frenando la rueda delantera exterior, corrigiendo la trayectoria del vehículo hacia la deseada.

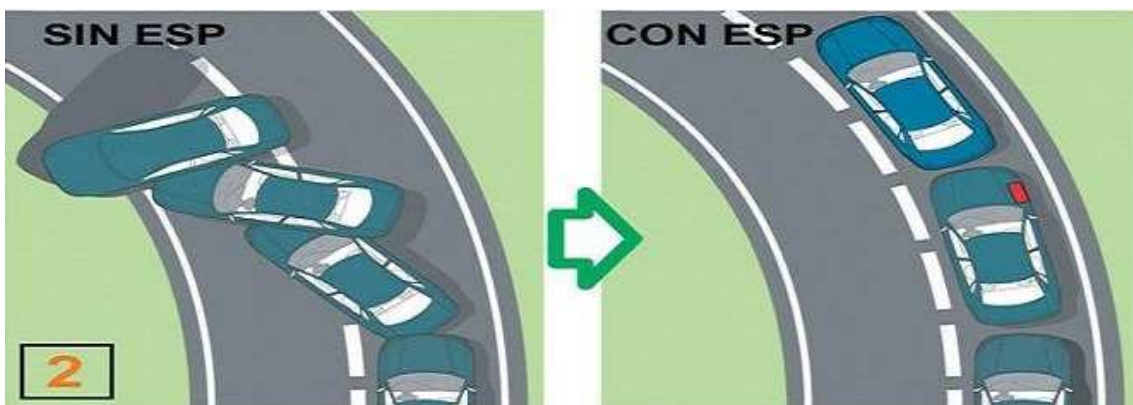


Figura 2.3. Efecto del ESP en un sobreviraje

2.1.4 CONTROL DE CRUCERO ADAPTATIVO (ACC)

El ACC (Adaptative Cruise Control) regula la velocidad del vehículo de forma automática, adaptándose a las condiciones del tráfico existente, y permitiendo mantener una distancia de seguridad con respecto a los vehículos que circulan por delante. Mediante un sistema de radar de largo alcance, el ACC visualiza lo que el coche tiene por delante, ya sea otro coche u otro tipo de obstáculo. Si detecta un vehículo circulando a una velocidad más lenta, automáticamente ajusta la velocidad para mantener una distancia de seguridad, llegando incluso a detener el vehículo por completo. Al desaparecer el vehículo, el sistema vuelve a ajustar la velocidad hasta la velocidad anteriormente programada.

Este sistema es especialmente útil para evitar colisiones por alcance, ya que automáticamente el vehículo se adapta a las condiciones de tráfico existentes.

2.1.5 SISTEMAS DE ALUMBRADO

Se considera el sistema de alumbrado un sistema de seguridad activa, por la reducción de accidentes que conlleva su uso, y por la interactividad con el conductor, sin embargo, es el sistema que menos influye en el comportamiento del coche.

Actualmente, las bombillas halógenas están siendo sustituidas por la mayoría de los fabricantes por sistemas de iluminación con faros de xenon o incluso por sistemas con tecnología LED (Light Emission Diode), que reducen significativamente el consumo de energía.

Como mejora de estos sistemas, podría mencionarse el encendido automático de las luces de posición y cruce, que activa la iluminación del vehículo al detectar unas condiciones de iluminación deficiente. Además, también se están introduciendo sistemas de iluminación autoadaptables, que se basan en la posición y velocidad del vehículo para regular las luces. Es decir, el sistema orienta el haz de luz hacia la derecha, izquierda, arriba o abajo, en función de la trayectoria que en ese momento lleve el automóvil. Además, este tipo de sistemas son capaces de detectar la

presencia de otros vehículos, bajando la intensidad lumínica para no deslumbrar al resto de ocupantes de la vía.

Otro sistema de mejora que actualmente se está introduciendo en ciertos vehículos es el sistema de visión nocturna, que pese a no ser iluminación propiamente dicha, ayudan a una mejor visibilidad. Los objetos se detectan mediante unas cámaras infrarrojas, y las imágenes se emiten en el interior del vehículo, avisando al conductor de la presencia de obstáculos mediante una señal acústica.

2.1.6 NEUMÁTICOS

Elementos fundamentales en un vehículo, ya que son los encargados de transmitir todas las fuerzas que se realizan en el vehículo al suelo, siendo los responsables del comportamiento dinámico del mismo. Un neumático en mal estado, o en malas condiciones de inflado no será capaz de transmitir estas fuerzas, por lo que el vehículo perderá adherencia, y con ella, disminuye la capacidad de aceleración, frenado y viraje.

Actualmente hay sistemas de control de la presión de los neumáticos que avisan al conductor de una posible pérdida de presión. Estas pérdidas de presión pueden ser lentas, debidas al aumento de temperatura que sufre el neumático al circular a alta velocidad con una presión de inflado deficiente. Este tipo de pérdidas de presión son las causantes de la mayoría de “reventones” de neumáticos.

También pueden darse pérdidas de presión repentinas, aunque en estas últimas, el conductor es consciente de la posible avería por el comportamiento no habitual del vehículo.

2.1.7 DIRECCIÓN

Se conoce como dirección de un vehículo a todos los órganos que contribuyen a orientar las ruedas directrices en consonancia con las maniobras realizadas por el conductor. Su función principal es proporcionar un control direccional suficientemente

preciso para entre otras cosas, inscribirse en curvas, realizar maniobras de adelantamiento o de evasión ante obstáculos presentes en la carretera [5].

La dirección del vehículo ha estado en continua evolución, dando lugar a sistemas de dirección asistida hidráulica, electrohidráulica, y electromecánica. Las dos últimas adaptan su rendimiento en función de la velocidad a la que se circula, es decir, funcionan a pleno rendimiento cuando la velocidad del vehículo es baja, mientras que el grado de asistencia se reduce con velocidades más elevadas.

Actualmente, algunos fabricantes están introduciendo sistemas de dirección activa, caracterizados por permitir diferentes grados de giro de las ruedas para un mismo giro de volante, en función de la velocidad.

Cabe destacar, que para evitar la intrusión en el habitáculo en caso de accidente, la columna de dirección suele tener una parte deformable o retráctil.

2.1.8 SUSPENSIÓN

El sistema de suspensión es el responsable de absorber las desigualdades del terreno por el que se circula, manteniendo en todo momento las ruedas en contacto con el pavimento.

La suspensión habitualmente se compone de un elemento flexible (muelle de ballesta o helicoidal) y un elemento de amortiguación (amortiguador)

Como mejora de este sistema, se puede hablar de la suspensión activa, que combina elementos hidráulicos y neumáticos, controlados por ordenador. Este tipo de suspensión varía la flexibilidad de la suspensión adaptándola a las condiciones de marcha del vehículo, controlando la inclinación de la carrocería a medida que surgen obstáculos. El sistema permite regular uno o ambos ejes para circular a altas velocidades, o en carreteras en mal estado [7].

La figura 2.4 muestra un eje delantero con sistema de suspensión multibrazo.

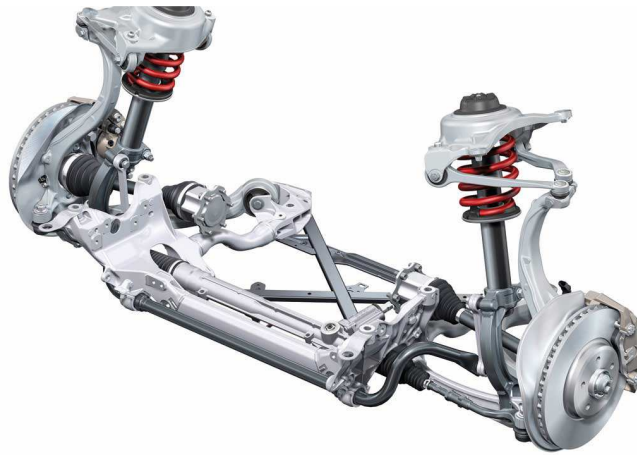


Figura 2.4. Sistema de suspensión

2.2 SEGURIDAD PASIVA

Se denomina seguridad pasiva al conjunto de sistemas orientados a minimizar los daños producidos en los ocupantes del vehículo al producirse el accidente. En este sentido, los elementos más importantes serían el cinturón de seguridad, el airbag, los reposacabezas, el bastidor y la carrocería.

2.2.1 EL FENÓMENO DE COLISIÓN

En un accidente se pueden diferenciar hasta tres tipos de colisiones diferentes:

- Colisión primaria entre el vehículo y el objeto con el que colisiona.
- Colisión secundaria, entre los ocupantes y los elementos del interior del vehículo.
- Colisión terciaria, entre los órganos internos y las paredes internas de los ocupantes del vehículo.

Es lógico pensar, que a la hora de proteger a los ocupantes del vehículo, es necesario, minimizar tanto como se pueda las colisiones secundarias o terciarias.

Tanto el vehículo como o sus ocupantes tienen una energía cinética en función de su masa y velocidad, y que es calculada como

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Donde m es la masa del vehículo y sus ocupantes y v es la velocidad a la que se desplazan.

Esta energía desaparece en el momento del accidente, y puede disiparse mediante la deformación del vehículo.

Conociendo la fuerza que se ejerce sobre el vehículo, la energía disipada puede calcularse mediante

$$E_{disipada} = Fd$$

Siendo d la deformación que sufre el vehículo.

Cabe pensar que cuanto mayor es la deformación del vehículo, menor será la energía disipada en los ocupantes, y por tanto, menores los daños sufridos por los ocupantes.

2.2.2 CARROCERÍA Y HABITÁCULO DE SEGURIDAD

Actualmente la mayoría de los vehículos se fabrican con una carrocería autoportante (figura 2.5), prescindiendo del bastidor, por la mayor rigidez que conlleva el uso de éste. La carrocería autoportante debe poder sujetar todos los elementos y cargas del automóvil, además de soportar los esfuerzos de flexión, torsión, aceleraciones, y todos los tipos de esfuerzos que implican la conducción del vehículo.

Todo esto, hace necesario que la estructura autoportante sea lo suficientemente rígida como para soportar este tipo de esfuerzos. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, un punto clave para reducir las lesiones en los accidentes, es la energía que el vehículo sea capaz de absorber mediante la deformación. Por lo tanto, para garantizar la seguridad, entran en juego unos factores clave, como las zonas de absorción de impacto, la deformación programada y el habitáculo de seguridad.



Figura 2.5. Carrocería autoportante

Las zonas de absorción de impacto, como la que se muestra en la figura 2.6, corresponden generalmente con la parte delantera y trasera del vehículo, diseñadas para disipar la energía del impacto mediante la deformación de éstas. Este tipo de zonas son efectivas en impactos frontales, y serán más o menos efectivas en función de la superficie con la que impacte el vehículo. Es decir a mayor superficie de impacto, mayor será la disipación de energía mediante todos los elementos que están en contacto, aun sufriendo una menor deformación. Sin embargo, cuando la superficie de contacto es menor, por ejemplo en un impacto contra un poste, las deformaciones están más concentradas, por lo que puede dar lugar a invasiones en el habitáculo.

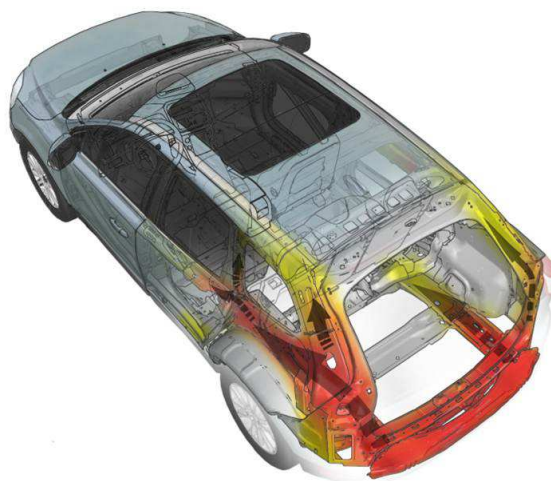


Figura 2.6. Zona de absorción de impacto trasera

Los elementos estructurales del vehículo se diseñan de manera que sean capaces de desviar los esfuerzos a otras zonas del vehículo, con el fin de repartir las deformaciones por la mayor parte del vehículo. De esta manera se puede optimizar las deformaciones de ciertas partes del vehículo sin que lleguen a afectar al habitáculo, de manera que la energía se disipa de manera gradual. Esto es lo que se conoce como deformación programada [8].

Los principales elementos que entran en juego en este tipo de deformación son:

- Largueros de espesor variable: de sección más pequeña en la parte delantera, y progresivamente mayor a medida que se acerca al habitáculo. Ideados para deformarse en función de la magnitud de la colisión.
- Largueros delanteros de cuello de cisne: se deforman por dicho cuello.
- Travesaños: transmiten las cargas de la colisión de un larguero a otro, repartiendo la disipación de energía.
- Largueros de horquilla: transmite los esfuerzos hacia el túnel central y la plataforma del automóvil.
- Puntos fusibles: muescas, dobleces y acanaladuras que se realizan sobre los elementos estructurales para facilitar su deformación en esos puntos en caso de colisión.
- Anclajes del motor: evitan la intrusión del motor en el habitáculo desplazando hacia abajo el motor en caso de colisión.

En la figura 2.7 se muestran los principales elementos de una estructura autoportante con deformación programada.



Figura 2.7. Estructura con deformación programada

Como ya se ha señalado, este tipo de deformaciones programadas y zonas de absorción de impacto, tienen como fin mantener lo más inalterado posible el habitáculo de seguridad. Este último podría definirse como la zona de la estructura destinada a los ocupantes, diseñada para garantizar su seguridad.

Este habitáculo debe ser lo suficientemente rígido para mantener su integridad en caso de accidente, por lo que se diseña para que se deforme lo menos posible. Además, evitar la deformación del habitáculo de seguridad garantiza el rescate y evacuación de los ocupantes del vehículo.

Los elementos fundamentales de este habitáculo son:

- Largueros delanteros y traseros
- Largueros superiores e inferiores
- Travesaño delantero
- Pilares
- Barras laterales
- Viguetas transversales
- Techo

El material mayoritario en la construcción de la carrocería del vehículo es el acero, del cual se emplean diferentes tipos en función de la pieza a desarrollar [21]. Los principales tipos de acero empleados son:

- Aceros convencionales. Con un límite elástico inferior a 220 GPa. Empleados en elementos con baja responsabilidad estructural, como aletas, o paneles de puertas.
- Aceros de alta resistencia con un límite elástico entre 220 y 450 GPa. Utilizados en panelería exterior, refuerzos, largueros, travesaños y piezas que requieren alta resistencia a fatiga. Suelen ser aceros Bake-Hardening, microaleados, o refosforados
- Aceros de muy alta resistencia: entre 450 y 800 GPa. Aceros de fase doble o fase compleja, empleados en elementos con gran importancia estructural, y piezas antiintrusión.
- Aceros de ultra alta resistencia: con un límite elástico superior a los 800 GPa. Aceros martensíticos o al Boro. Empleados en el habitáculo del motor para evitar la intrusión.

2.2.3 CINTURÓN DE SEGURIDAD

Se trata del elemento de seguridad pasiva más importante del vehículo. De hecho es de uso obligatorio, y la ley actual impone multas y sanciones a los conductores y ocupantes que no hagan uso de él.

Se trata de una banda de tejido sólido, destinado a retener al ocupante del vehículo en su posición dentro del habitáculo de seguridad. Al mantener al ocupante en su posición, se consigue evitar colisiones secundarias.

En un principio los cinturones de seguridad eran de dos puntos de anclaje, es decir, de un solo tramo, que solía retener al ocupante por las caderas, o por el torso. Estos diseños solían acarrear problemas de seguridad añadidos, ya que en el caso de los cinturones en la cadera (actualmente usados en aviones y autobuses), se podían producir lesiones en la columna. En el caso de los cinturones de torso, el ocupante podía deslizarse por debajo del cinturón, por lo que éste perdía toda su efectividad.

En 1959, el ingeniero de Volvo Nils Bohlin, patentó el cinturón de seguridad de tres puntos, para montarlo en el Volvo Amazon. Tras comprobar el éxito de este tipo de cinturón, se liberó la patente para que el resto de fabricantes pudieran montarlo en sus vehículos. El esquema de un cinturón de seguridad de tres puntos junto con el carrete inercial y el pretensor se muestra en la figura 2.8.



Figura 2.8. Esquema del cinturón de seguridad

La efectividad de este tipo de cinturón se debe al reparto de fuerzas que hace el cinturón sobre dos zonas de alta resistencia del cuerpo, como son la pelvis y el torso.

Como elementos de mejora de este elemento, pueden citarse entre otros, el carrete inercial, los pretensores, y los limitadores de esfuerzo. El carrete inercial (en la figura 2.9 se muestra su funcionamiento) permite desenrollar el cinturón de manera lenta y progresiva para ajustarlo a su posición de uso. Posteriormente, el carrete trata de volver a enrollar el cinturón, minimizando la holgura entre el cinturón y el cuerpo. Sin embargo en caso de accidente, el carrete se bloquea, evitando así un desenrollado brusco del cinturón, y por lo tanto una pérdida de eficacia de éste. De esta manera, el ocupante queda “fijado” en su posición dentro del habitáculo.

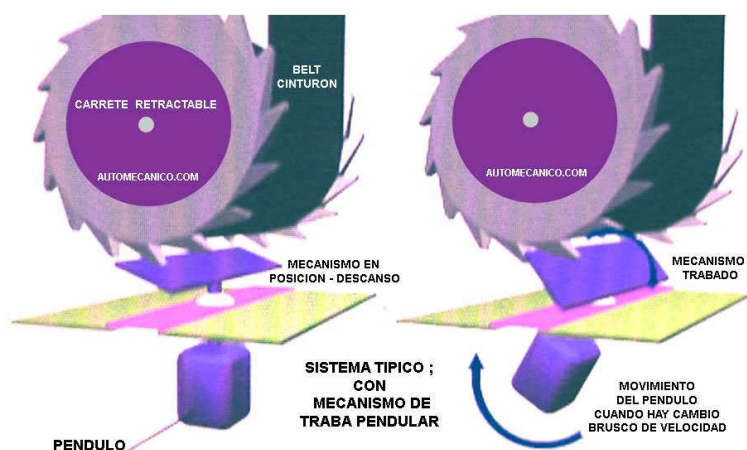


Figura 2.9. Funcionamiento del carrete inercial

Los pretensores actúan en caso de colisión, ajustando al máximo el cinturón al ocupante. En la actualidad, los pretensores suelen ser pirotécnicos y suelen estar situados en el segundo punto de anclaje. Cuando se detecta una colisión, el pretensor se activa mediante una leve detonación tensando el cinturón y evitando posibles holguras que pudiesen quedar con el cuerpo. De esta manera, cuando el ocupante comienza a desplazarse como consecuencia del accidente, el cinturón ya está completamente tenso, minimizando los posibles desplazamientos.

El limitador de tensión actúa en último lugar, y es un elemento que trata de reducir los daños ocasionados por el propio cinturón ya que en una colisión violenta, la tensión que puede ejercer el cinturón sobre el torso puede provocar lesiones indeseadas. Una vez llegado a un punto máximo de tensión prefijado, el limitador estira de manera controlada el anclaje, permitiendo un cierto desplazamiento y reduciendo la presión entre el cinturón y el cuerpo.

Por último, destacar que también se emplean cinturones de seguridad de cuatro y cinco puntos, aunque éstos suelen estar destinados a vehículos de competición deportiva o sistemas de retención infantil.

2.2.4 REPOSACABEZAS

En una colisión por alcance, el cuerpo de los ocupantes tiende a desplazarse hacia delante, de manera solidaria con el resto del vehículo al que está “fijado” por el cinturón de seguridad. Sin embargo, la cabeza tiende a mantenerse en su posición. Lo que se produce de esta manera es el conocido latigazo cervical, que puede provocar graves lesiones en las vértebras y médula espinal, llegando incluso a provocar la muerte del ocupante.

Para evitar el latigazo cervical los reposacabezas deben estar colocados a una altura adecuada al ocupante, de manera que eviten este desplazamiento de la cabeza con respecto al resto del cuerpo.

En la figura 2.10 se muestra el funcionamiento de un reposacabezas activo. Este tipo de dispositivos hacen que, en caso de accidente, el reposacabezas se desplace hacia delante, reduciendo el espacio con la cabeza para sujetarla, y evitar movimientos indeseados del cuello.

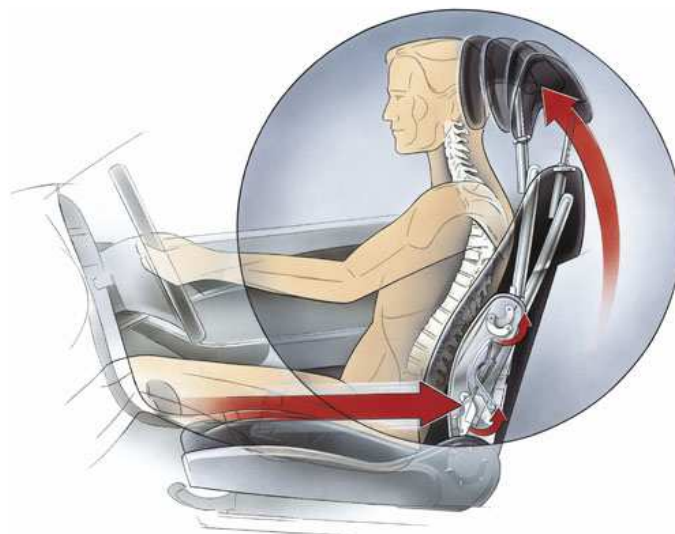


Figura 2.10. Funcionamiento del reposacabezas activo

2.2.5 AIRBAG

Elemento de seguridad pasiva que consiste en una bolsa de nylon que se llena de gas en el momento de la colisión, para evitar colisiones secundarias de los pasajeros con el estructura interna del vehículo.

Consta fundamentalmente de tres componentes, a saber, una bolsa de nylon, unos sensores capaces de detectar el impacto, y un sistema de inflado, basado en una reacción química.

Cuando los sensores detectan el impacto, el sistema de inflado provoca una reacción química, liberando una cantidad de gas suficiente para llenar la bolsa en un tiempo que puede variar en función del tipo de airbag, pero que suele estar entre los 3 milisegundos para un airbag de lateral, y los 20 milisegundos para un airbag frontal. Inmediatamente después de la colisión, el airbag comienza a desinflarse para permitir la movilidad dentro del vehículo.

Actualmente se incorporan al vehículo diferentes tipos de airbags, siendo los más comunes:

- Airbag frontal: responsable de evitar colisiones contra el volante y el salpicadero a los ocupantes de las plazas delanteras del vehículo, donde están situados. Fueron los primeros en desarrollarse e incluirse en la fabricación.
- Airbag lateral: protegen a los ocupantes de los impactos contra la estructura lateral del vehículo frente a una colisión lateral. Instalados en los asientos o en el interior de las puertas.
- Airbag de cortina: protegen la cabeza de impactos contra la ventanilla. Se sitúan en el interior del marco del vehículo a la altura de las ventanillas.
- Airbag de rodilla: emplazados en la parte baja del salpicadero para evitar colisiones de las rodillas con los elementos bajos del vehículo.
- Airbag de peatón: uno de los más novedosos, destinado a la protección del peatón. Se despliega en el exterior del vehículo sobre el capó cuando se detecta un atropello.

La figura 2.11 muestra el interior de un vehículo con los airbags frontales laterales y de cortina inflados.



Figura 2.11. Airbags frontales, laterales y de cortina

Cabe destacar que el airbag es un elemento complementario del cinturón de seguridad, ya que sin la retención proporcionada por el cinturón, el impacto que sufre el ocupante con el airbag, puede llegar a ser incluso letal.

3 EURONCAP- ENSAYOS DE CHOQUE

3.1 Historia

EuroNCAP [2] (European New Car Assessment Programme, "Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos") es un programa de seguridad para automóviles desarrollado por varios gobiernos europeos, fabricantes de vehículos y organizaciones relacionadas con el sector de la automoción y la seguridad vial. Entre los integrantes españoles que la componen, destacan la Generalitat de Cataluña y Applus+IDIADA.

Este consorcio nace en 1997 con el objetivo de evaluar la seguridad que ofrecen los nuevos automóviles, mediante la realización de una serie de ensayos que tratan de reproducir diferentes tipos de accidentes, y evaluando los daños sufridos por los ocupantes mediante los valores obtenidos en los dummies de prueba.

Este tipo de ensayos se realizan por grupos dentro del mismo segmento de automóvil, obteniendo una calificación, basada en un número de estrellas entre cero y cinco. Esta calificación depende de los elementos de seguridad activa y pasiva, y del grado de protección que ofrece el vehículo a los ocupantes, tanto adultos como niños, y a los peatones.

A lo largo de los años se ha ido incrementando el número de ensayos que realiza esta organización, elevando en gran medida el nivel de exigencia requerida a un vehículo en materia de seguridad.

3.2 Pruebas Euroncap

Las pruebas y test realizados por euroNCAP se pueden agrupar en cuatro grupos en función de la seguridad ofrecida por el vehículo en cada campo. El primer grupo de pruebas es el de protección de los ocupantes adultos, que engloba las pruebas de impacto frontal, impacto frontal con solape parcial, impacto lateral, impacto lateral de poste, latigazo cervical y sistema de frenado de emergencia autónomo en ciudad (AEB).

El segundo bloque de pruebas lo compondrían los ensayos realizados para evaluar la protección de ocupantes infantiles. Estos ensayos se realizan a la vez que los anteriores, colocando dummies infantiles en sus correspondientes sistemas de retención infantil. Además se evalúan otros factores como los anclajes, desconexión de airbag, etc.

El tercer grupo de pruebas son las que se realizan para evaluar la protección al peatón. En concreto, impacto en la cabeza, impacto en la parte superior de las piernas e impacto en la parte inferior de las piernas.

Por último, el último bloque de pruebas lo constituye una serie de ensayos destinados a evaluar la asistencia a la seguridad ofrecida por el vehículo. Se ensayan en este bloque el control electrónico de estabilidad (ESC), recordatorio de aviso de cinturón (SBR), sistema de control de velocidad SAS, AEB interurbano, y asistencia de cambio de carril.

A continuación se resumen los principales ensayos realizados por euroNCAP, descritos en sus correspondientes protocolos.

La figura 3.1 muestra los diferentes tipos de impactadores empleados en las pruebas de protección al peatón, así como sus zonas de impacto en el vehículo.

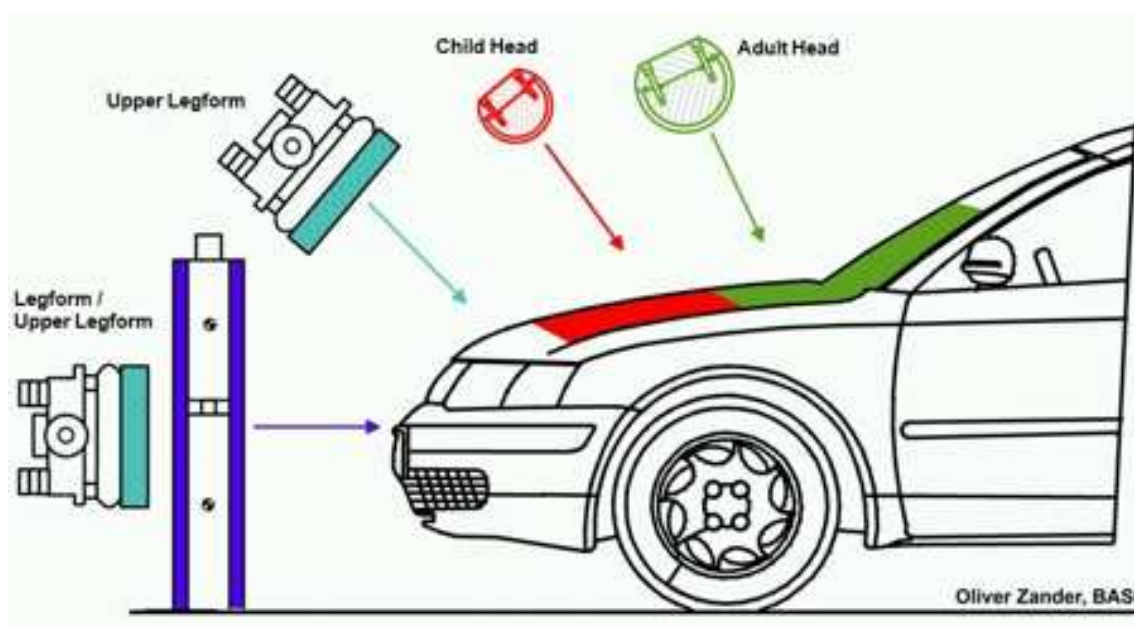


Figura 3.1. Impactadores usados en los test

3.2.1 Impacto frontal con solape parcial

Los impactos frontales son los que más muertes y lesiones graves provocan, siendo el caso más habitual, el choque entre dos vehículos que circulan en sentido opuesto.

La figura 3.2 muestra una representación de este ensayo.



Figura 3.2. Impacto frontal con solape parcial

En este ensayo el vehículo choca a una velocidad de 64 km/h contra una barrera deformable con una superposición del 40%. En el interior del vehículo se sitúan dos dummies de talla adulta y varón, en los asientos delanteros, y otros dos dummies de niños en los asientos posteriores con sillas de retención infantil.

El objetivo de este ensayo es evaluar la estructura del vehículo, y la eficacia en la absorción de energía al deformarse, dejando el habitáculo lo menos deformado posible. Así mismo, se evalúan también los daños sufridos en los dummies, en cabeza, cuello, pecho, rodilla, fémur, pelvis, pierna y pie.

3.2.2 Impacto frontal completo

El objetivo de este ensayo es evaluar las fuerzas provocadas por las desaceleraciones, especialmente en el tórax de los ocupantes más vulnerables.

La figura 3.3 muestra una representación de este ensayo.



Figura 3.3. Impacto frontal completo

El vehículo impacta contra la barrera a una velocidad de 50 km/h, con un dummy de mujer adulta en el asiento del conductor. Se miden los daños ocasionados en los dummies, en los mismos puntos referidos en el impacto frontal con solape parcial.

Esta prueba es complementaria de la de impacto frontal con solape parcial, ya que de lo que se trata es de conseguir un sistema de retención lo suficientemente rígido para sujetar el dummy masculino a 64 km/h, y lo suficientemente suave para no provocar lesiones de gravedad por las desaceleraciones en el dummy femenino a 50 km/h.

3.2.3 Impacto lateral

En comparación con el impacto frontal, en un impacto lateral existe muy poco espacio en el interior del vehículo para absorber la energía de la colisión mediante deformaciones en la estructura, lo cual puede provocar graves daños a los ocupantes.

En este ensayo, una barrera deformable impacta en el lateral del vehículo a 50 km/h, en el que se sitúa un dummy varón en el asiento del conductor, y varios dummies de niños en los asientos posteriores. Se evalúan los daños en cabeza, pecho, abdomen y pelvis.

3.2.4 Impacto lateral de poste

Este impacto trata de representar la colisión lateral de un vehículo contra árboles o postes. En este tipo de accidentes, la deformación y la penetración suele ser muy grande por lo que se pueden provocar daños muy graves sobre todo en la cabeza.

En este ensayo el vehículo colisiona contra un poste de 254 mm a una velocidad de 20 km/h. Se coloca un dummy varón en el asiento del conductor y se evalúan los daños en cabeza, pecho abdomen y pelvis.

En la figura 3.4 se puede apreciar la penetración y el daño producido por el poste durante la colisión.



Figura 3.4. Impacto lateral de poste

3.2.5 Latigazo cervical

En las colisiones traseras a baja velocidad, suelen producirse distorsiones en la columna vertebral, provocando lo que se conoce como lesiones de latigazo cervical. Este tipo de colisiones, habitualmente no producen graves daños ni muertes pero este tipo de lesiones tienen un gran efecto en las personas.

Los asientos y sistemas de sujeción de la cabeza se prueban en un trineo con un dummy a baja velocidad, entre 16 y 24 km/h, midiendo las aceleraciones en las vértebras, y las fuerzas provocadas en el cuello.

3.2.6 AEB para ciudad e interurbano

El sistema de frenado de emergencia autónomo, es un sistema de seguridad, que advierte, al conductor, disminuye la velocidad, o incluso detiene el vehículo al detectar una posible colisión con otro vehículo que circula por delante.

En el caso de AEB para ciudad, se conduce el vehículo a una velocidad entre 10 y 50 km/h hacia la parte trasera de otro vehículo simulado. En el caso del AEB interurbano se realizan varias pruebas. En primer lugar se conduce el vehículo hacia un vehículo

detenido, en segundo lugar hacia un vehículo que circula más lento, y en tercer lugar, siguiendo a un vehículo que empieza a frenar de forma repentina.

En estas pruebas, la máxima puntuación se concede cuando el sistema de frenado de emergencia autónomo, consigue evitar la colisión, aunque también se valora positivamente el hecho de que se reduzca la velocidad a la que impactan los vehículos.

3.2.7 Protección de ocupantes infantiles

Como ya se ha comentado, las pruebas de impacto frontal, impacto frontal con solape parcial e impacto lateral, se sitúan dummies infantiles en las sillas de seguridad infantiles recomendadas por el fabricante para evaluar los daños producidos en éstos. Así mismo, también se hacen ensayos de protección al peatón con modelos infantiles como los mostrados en la figura 3.5.



Figura 3.5. Dummies infantiles

Además, euroNCAP evalúa otros factores, como la accesibilidad a los anclajes, disponibilidad de sistema ISOFIX, instrucciones claras de montaje, interruptor de desactivación del airbag delantero, o la funcionalidad de los elementos necesarios para el anclaje del sistema de retención infantil (SRI).

3.2.8 Impacto en la cabeza

Esta prueba promueve el uso de sistemas destinados a la protección del peatón, tales como la generación de espacios libres por la deformación, los capós desplegados o los airbag para peatón.

Al tratarse de la prueba en la que se basa este proyecto, esta prueba será descrita por completo en el capítulo 5.

3.2.9 Impacto en la parte superior de las piernas

Este es otro ensayo de protección al peatón. En este tipo de ensayos, se utiliza un impactador con la forma de la parte superior de la pierna de un adulto, lanzado hacia el capó del vehículo a una velocidad de 40 km/h tal como se representa en la figura 3.6.

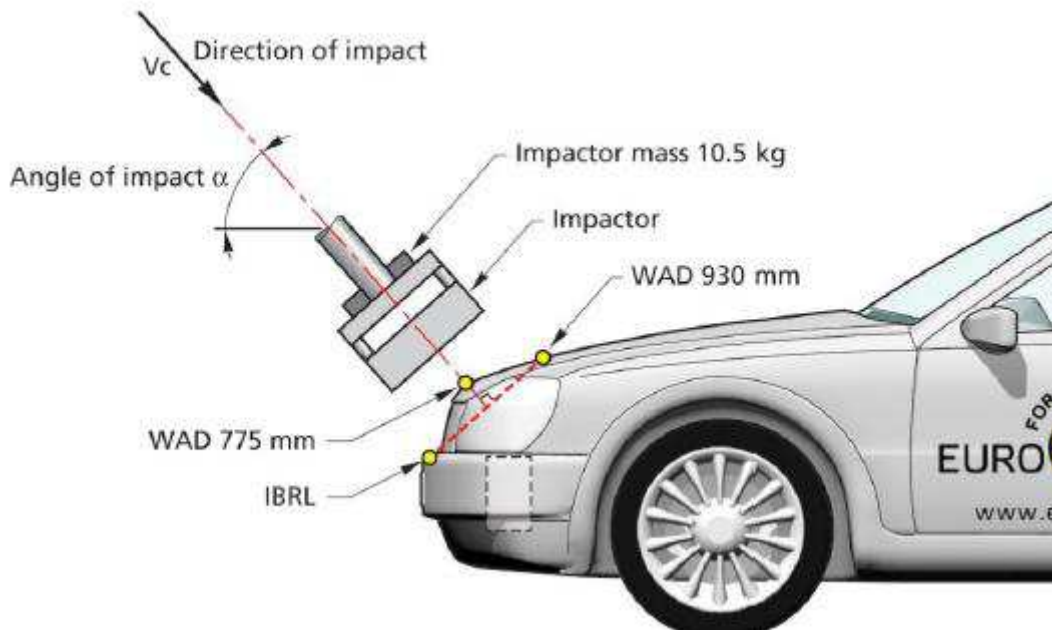


Figura 3.6. Impacto en la parte superior de las piernas

En este caso, la forma del capó es el elemento que puede diferenciar la gravedad de las lesiones provocadas al peatón. Se evalúan la suma de fuerzas recibida y el momento que sufre el impactador, estableciendo unos límites admisibles que supondrían el 20% del riesgo de sufrir una fractura de pelvis.

3.2.10 Impacto en la parte inferior de las piernas

Se trata de otro test de protección al peatón. Trata de evaluar los posibles daños y fracturas en la parte baja de la pierna, y rodilla. Este tipo de lesiones no suelen ser graves, aunque sí que suelen llevar asociadas discapacidades permanentes. Similar al de la parte superior de las piernas, esta vez se emplea un impactador simulando la parte inferior del a pierna de adulto, también lanzado a 40 km/h. En la figura 3.7 se observa el choque del impactador contra el parachoques de un vehículo.

Se realizan mediciones del momento sufrido en el impactador, y de las elongaciones en los ligamentos de la rodilla.



Figura 3.7. Impacto en la parte inferior de las piernas

3.2.11 Control electrónico de estabilidad (ESC)

El control electrónico de estabilidad es un sistema que mejora la estabilidad en la dirección, controlando las fuerzas de frenado en cada una de las ruedas del mismo eje, induciendo una corrección en el giro frente a una pérdida de control.

El sistema se evalúa llevando a cabo una serie de pruebas denominadas "maniobra evasiva con doble cambio de carril", una maniobra en la que el vehículo cambia de

carril en dos ocasiones. Para ello, el volante se gira bruscamente unos 270 grados con el vehículo circulando a 80 km/h

A partir de 2014, el ESC es obligatorio para todos los vehículos nuevos, por lo que euroNCAP ha dejado de realizar esta prueba, al no constituir un factor diferencial en la seguridad ofrecida por el vehículo.

3.2.12 Sistema de control de velocidad (SAS)

La velocidad excesiva es una de las principales causas de accidentes, además de ser un factor clave en la gravedad de éstos.

EuroNCAP evalúa estos sistemas en relación con sus funciones, a saber, informar al conductor sobre el límite de velocidad permitido en cada momento, advertir de que la velocidad a la que se circula está por encima de la permitida, y en última instancia, evitar que la velocidad máxima permitida sea sobrepasada.

Se evalúa el sistema a 50 km/h (ciudad), 80 km/h (carreteras interurbanas) y 120 km/h (autopistas). En todos los casos se comprueba la precisión con la que se mantiene la velocidad establecida.

En los sistemas más avanzados, la velocidad máxima se establece automáticamente mediante el reconocimiento de señales de tráfico, o la posición en un mapa digital.

3.2.13 Asistencia de cambio de carril

Este sistema de asistencia de cambio de carril controla la posición del vehículo, y avisa al conductor de un cambio de carril involuntario. A su vez si el vehículo dispone de ello, el sistema de permanencia en el carril, ayuda al conductor a permanecer en el carril.

En realidad, euroCAP no desarrolla pruebas evaluando estos sistemas, si no que otorga puntos a los fabricantes que acreditan que tienen instalados estos sistemas. Los fabricantes a su vez tienen que demostrar que han instalado este tipo de sistemas y que han pasado satisfactoriamente los ensayos realizados por la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [9], equivalente norteamericano de euroNCAP.

3.2.14 Recordatorio de aviso de cinturón de seguridad (SBR)

El cinturón de seguridad es posiblemente el elemento más efectivo para garantizar la seguridad del ocupante dentro del vehículo.

El sistema de recordatorio de aviso del cinturón de seguridad (SBR) es un sistema que emite señales, instando a los ocupantes del vehículo a ponerse el cinturón de seguridad. Este tipo de señales pueden activarse cuando el vehículo ha estado en movimiento un cierto tiempo, cuando ha recorrido una distancia, o cuando ha llegado a una determinada velocidad. Las señales pueden ser una señal audiovisual intermitente, un mensaje de texto, o un mensaje de voz.

EuroNCAP evalúa tanto el volumen como la duración de las señales. También se valora la posición y la claridad de estas señales.

3.3 Valoración EURONCAP

EuroNCAP utiliza un sistema de valoración en función de los resultados obtenidos en los cuatro grandes bloques de estrellas, a saber, la protección de ocupantes adultos, protección de ocupantes infantiles, protección al peatón, y tecnologías de asistencia a la seguridad.

En función de las puntuaciones obtenidas en cada prueba, se le asignan un número de estrellas que se interpretan de la manera siguiente:

- Seguridad 5 estrellas: buen rendimiento general de protección en caso de colisión. Bien equipado con tecnología sólida de prevención de colisiones.
- Seguridad 4 estrellas: buen rendimiento general de protección en caso de colisión. Posible presencia de tecnología de prevención de colisiones.
- Seguridad 3 estrellas: buena protección de ocupantes en general pero falta de tecnología de prevención de colisiones.
- Seguridad 2 estrellas: protección ante colisiones nominal pero falta de tecnología de prevención de colisiones.

- Seguridad 1 estrella: protección contra colisiones mínima.

Cabe destacar, que las valoraciones euroNCAP van más allá de los requisitos legales exigidos a los fabricantes, por lo que estas valoraciones deben ser entendidas como elementos comparativos entre vehículos del mismo sector, nunca como requisitos para el correcto funcionamiento del vehículo. El hecho de que un vehículo reciba una valoración con pocas estrellas, no quiere decir que sea inseguro, o que no pueda legalmente circular, sino que es menos seguro que otros vehículos que han obtenido más estrellas en sus valoraciones.

4 ELEMENTOS FINITOS

Uno de los principales retos del ingeniero, consiste en analizar, calcular y desarrollar soluciones para el diseño de cualquier elemento, proceso o sistema. Para ello, es necesario un modelo matemático capaz de predecir de manera cuantitativa y cualitativa el comportamiento de estos elementos.

El primer problema que aparece es la existencia de dos tipos de sistemas, discretos y continuos. En los sistemas discretos, el sistema está claramente dividido en elementos diferenciables entre sí, por lo que el análisis y cálculo de estos sistemas puede realizarse en función de un número finito de parámetros y ecuaciones.

Por contrapartida, en un sistema continuo, no es posible diferenciar los elementos que componen el sistema, por lo que los parámetros a analizar son infinitos. Hasta la llegada del método de elementos finitos, este tipo de sistemas se abordaban de manera analítica, pero este método solo es fiable en sistemas muy sencillos [10].

Aplicando el método de elementos finitos lo que se consigue es pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad, a un sistema discreto, con un comportamiento definido por un número finito de grados de libertad.

4.1 PRINCIPIOS BÁSICOS

El método de los elementos finitos (MEF) se basa en dos principios fundamentales:

- Discretización: o transformar un sistema continuo en un complejo de sistemas discretos interactuando entre sí. Así se consigue que los infinitos parámetros que habría que analizar en un sistema continuo, pasen a ser un número finito.
- Interpolación: aproximación de los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos [11].

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema continuo son ecuaciones diferenciales por sus infinitos grados de libertad, mientras que tras discretizar el sistema, se obtiene un número determinado de grados de libertad y por tanto un sistema de ecuaciones, más fáciles de resolver que las diferenciales.

Los elementos obtenidos mediante el sistema de discretización definen su comportamiento mediante un sistema de ecuaciones lineales. Cualquier parámetro definido por una ecuación no lineal, tiene que ser resuelto gradualmente de forma lineal [12].

El método de elementos finitos calcula el valor de cualquier parámetro en los nodos creados en la discretización. Una vez hecho esto, y mediante interpolaciones, aproxima los resultados a todos los puntos del sistema continuo [13].

Cabe destacar que éste es un método aproximado, basado en la discretización e interpolación, por lo que la precisión de los resultados obtenidos depende en gran medida del número de elementos que utilicemos. Esto es, a mayor número de divisiones del sistema inicial, obtendremos resultados más precisos.

4.2 PROBLEMAS NO LINEALES

No todos los parámetros que se analizan en un sistema pueden definirse mediante ecuaciones lineales. Por ejemplo, como se observa en la figura 4.1 el comportamiento de un material con respecto a las deformaciones sufridas solamente es lineal hasta el punto en el que se llega al límite elástico. A partir de aquí, es muy evidente que deja de comportarse de manera lineal.

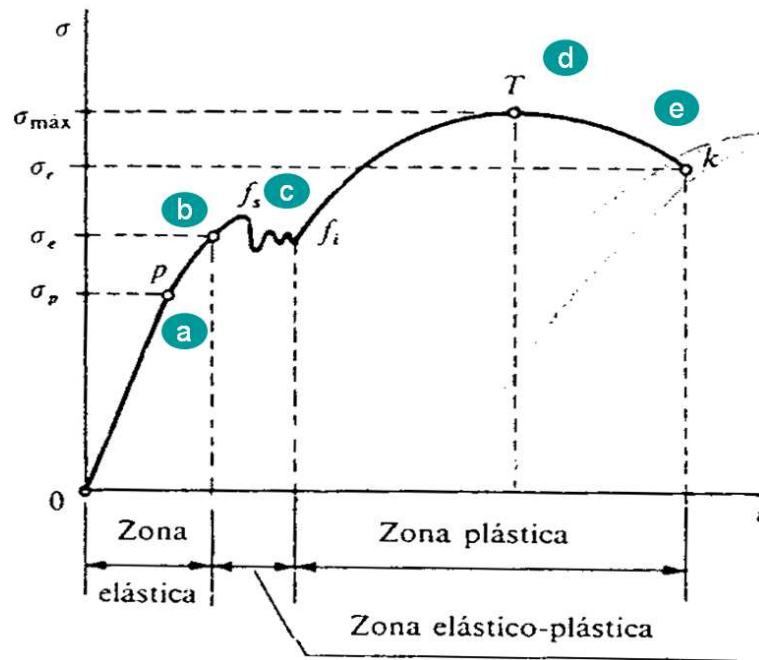


Figura 4.1. Gráfica tensión-deformación

Además de esto, también hay que tener en cuenta el hecho de las condiciones de contorno cambiantes, que acentúan esa condición de no linealidad en cualquier problema que se analiza.

Teniendo en cuenta que en el presente proyecto se van a analizar impactos, es posible que los elementos empleados pasen de esa zona elástica con un comportamiento lineal a la zona plástica de carácter no lineal.

4.3 LS-DYNA

LS-DYNA es un paquete de software de elementos finitos de uso general, capaz de simular situaciones complejas del mundo real. Se basa en el cálculo de elementos finitos, con sistemas no lineales y con una dinámica transitoria, mediante la integración en tiempo explícito. Se utiliza en la industria automotriz, aeroespacial, construcción, aplicaciones militares y de bioingeniería.

El programa ha sido desarrollado por la empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC), la cual, permite descargar gratuitamente de su página web todo tipo de manuales y tutoriales para el uso del programa [4] [14] [15].

La no linealidad supone complicaciones como las condiciones de contorno cambiantes, grandes deformaciones o materiales que no presentan un comportamiento lineal.

La dinámica transitoria quiere decir que analiza eventos de corta duración y alta velocidad, donde las fuerzas iniciales tienen gran transcendencia. Así, este paquete informático se usa para análisis de colisiones de automóviles, explosiones o manufacturación del metal (estampado, troquelado, etc.).

El programa se ha especializado para la industria del automóvil, en concreto, para el análisis de accidentes, implementando el programa con elementos tales como cinturones de seguridad, airbags, o dummies, tal como se representa en la figuras 4.2 y 4.3.

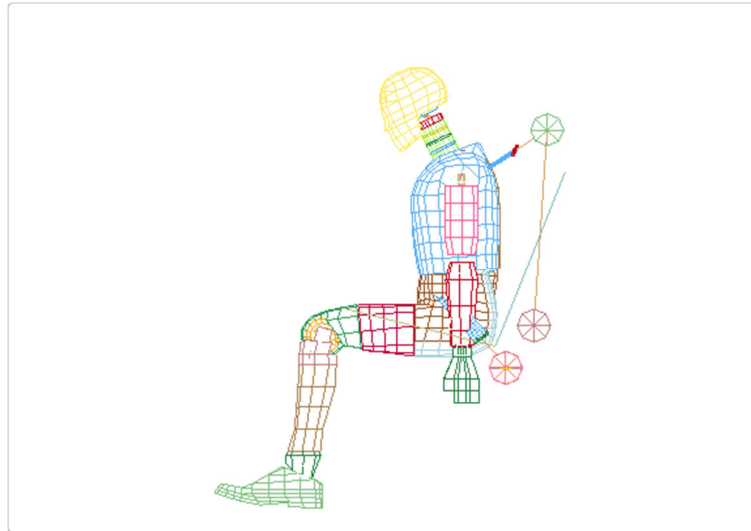


Figura 4.2. Dummy implementado en LS-DYNA

Además de LS-DYNA, LSTC también desarrolla un programa de pre y post-procesado, disponible gratuitamente en su página web, llamado LS-PREPOST, fundamental para el desarrollo de este proyecto.

Esta herramienta, es la que permite introducir todos los parámetros necesarios para el análisis que se desea realizar. Posterior a la realización de los cálculos, permite analizar todos los resultados obtenidos, tanto de forma numérica, como con una interfaz gráfica avanzada. Como ya se ha explicado anteriormente, tanto LS-DYNA, como LS-PREPOST, están muy especializados en la simulación de accidentes por lo que incluyen

entre sus múltiples opciones, el cálculo directo de parámetros básicos en esta disciplina, como el Head Injury Criterion (HIC), o el Chest Severity Index (CSI).

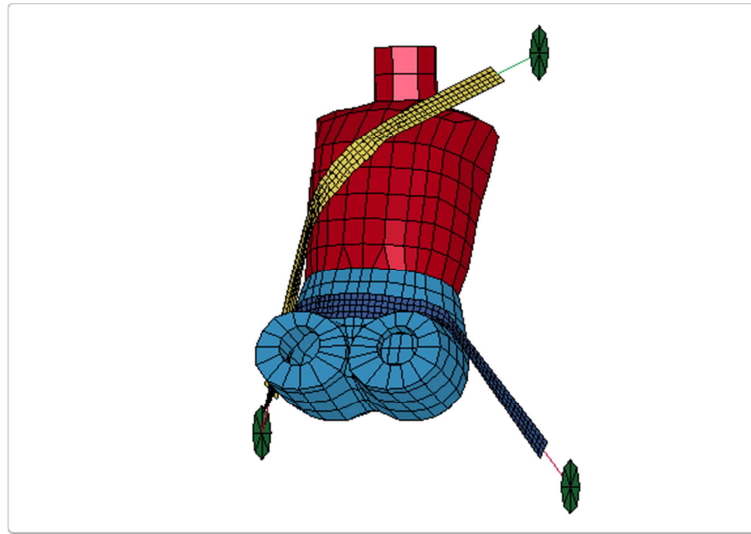


Figura 4.3. Cinturón de seguridad en LS-DYNA

5 PROTOCOLO DE ENSAYO DE PROTECCION DE PEATONES

Las condiciones del ensayo quedan definidas en el reglamento EC 631/2009 del Parlamento Europeo [16]. Este reglamento se crea para establecer las especificaciones y requisitos de los ensayos de protección del peatón y otros usuarios vulnerables, incluyendo en su redacción, los test de impacto en la parte superior de la pierna con el parachoques, impacto en la parte inferior de la pierna con el parachoques, parte superior de la pierna con el límite del capó, impacto de cabeza con el capó, impacto de cabeza de niño con el capó, e impacto de cabeza de adulto con el parabrisas.

Pariendo de este reglamento, euroNCAP desarrolla un protocolo para cada uno de los tests. El que se describe a continuación es el protocolo euroNCAP que concierne a este proyecto, es decir los test de impacto de cabeza de niño y adulto sobre el capó y parabrisas del automóvil. Para el presente proyecto se ha utilizado la versión del protocolo 4.3 de febrero de 2009 (en vigor a la fecha de realización de este proyecto y posteriormente modificado)[3].

5.1 Preparación del vehículo

5.1.1 Condiciones iniciales

Los protocolos dictan una serie de condiciones iniciales relativas al peso y suspensión del vehículo que se describen a continuación:

- Vaciado y rellenado del depósito de combustible hasta la capacidad descrita por el fabricante.
- Chequeo y rellenado del nivel de aceite y otros líquidos necesarios para el correcto uso del vehículo hasta su nivel máximo.
- La rueda de repuesto y sus correspondientes herramientas deben estar en su posición en el vehículo.
- Se debe retirar la placa de matrícula y de ser posible sus sujeciones.
- Se colocan una masa de 75 kg en el asiento del conductor y otra de 75 kg en el asiento del acompañante. Si es posible desplazar los asientos longitudinalmente, éstos deber estar en su posición media.
- Las ruedas deben estar infladas para media carga según las especificaciones del fabricante.
- Si la suspensión es regulable, se debe ajustar a la posición correcta para circular a 40 km/h.

5.1.2 Marcado del vehículo

Con respecto al marcado del vehículo, a continuación se describen las líneas necesarias para desarrollar el test de impacto de cabeza, que es el que se desarrolla en el presente proyecto.

- Línea de referencia lateral del capó:
Se define la línea de referencia lateral del capó como el trazo geométrico que une los puntos más altos de contacto entre una línea recta de 700 mm de largo, y el capó y los pilares del coche, mientras se desplaza esta línea, inclinada 45° en dirección longitudinal (ver figura 5.1)

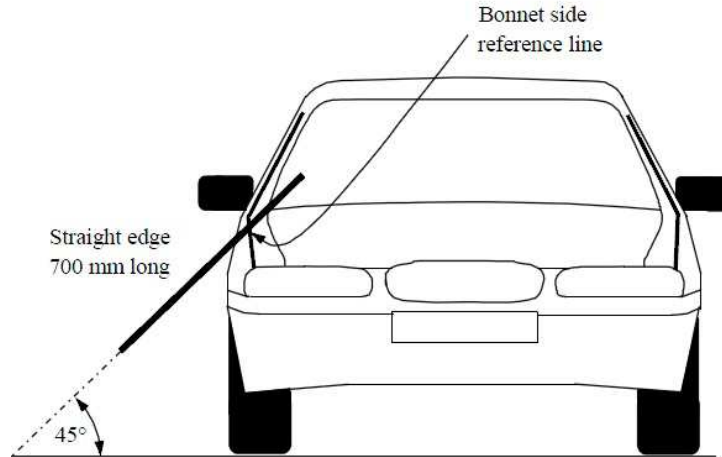


Figura 5.1. Línea de referencia lateral del capó

- Wrap around distances (WAD):

Se coloca una cinta flexible o un cable graduado, verticalmente desde el suelo, justo debajo del límite frontal del parachoques.

Se estira la cinta a lo largo del parachoques y el capó, asegurando que se mantenga en un plano vertical longitudinal (ver figura 5.2)

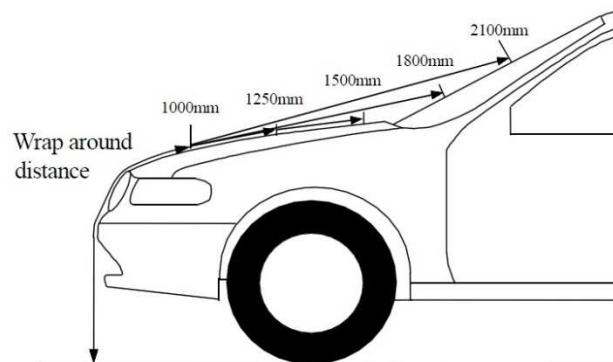


Figura 5.2. Wrap around distances

Se marcan en el capó, parabrisas y pilares, las distancias a 1000 mm, 1250 mm, 1500 mm, 1800 mm y 2100 mm. Una vez marcadas las distancias, se traslada la cinta 100mm transversalmente a otro plano vertical y longitudinal, marcando de nuevo las anteriores distancias. Este paso se repite a lo largo de toda la anchura del vehículo, entre las líneas laterales de referencia.

Una vez marcadas todas las distancias, se unen con líneas continuas delimitando así las líneas de 1000 mm, 1250 mm, 1500 mm, 1800 mm y 2100 mm (ver figura 5.3)

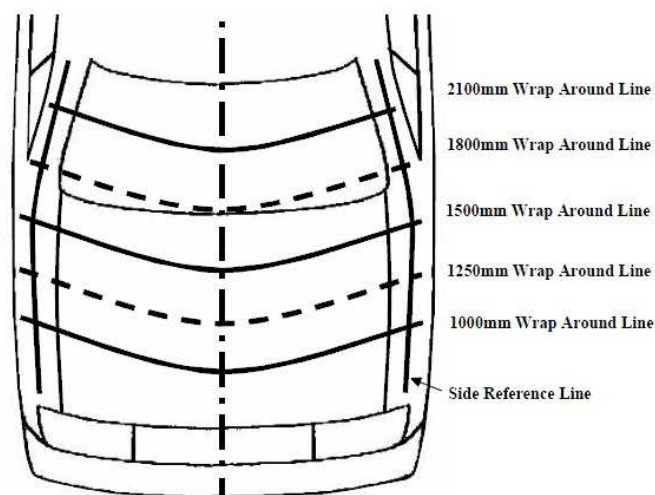


Figura 5.3. Wrap around lines

El área delimitada entre las líneas de 1000 mm y 1500 mm corresponde al área de ensayo del impactador del niño, mientras que la zona delimitada entre las líneas de 1500 mm y 2100 mm corresponde a los ensayos de adulto.

Las WAD se deben dividir en 12 partes iguales, quedando divididas las zonas en 6 áreas para la zona del adulto, consistentes en cuatro cuartos, y otras 6 áreas de cuatro cuartos para la zona del niño, quedando la denominación de las zonas como se muestra en la figura 5.4

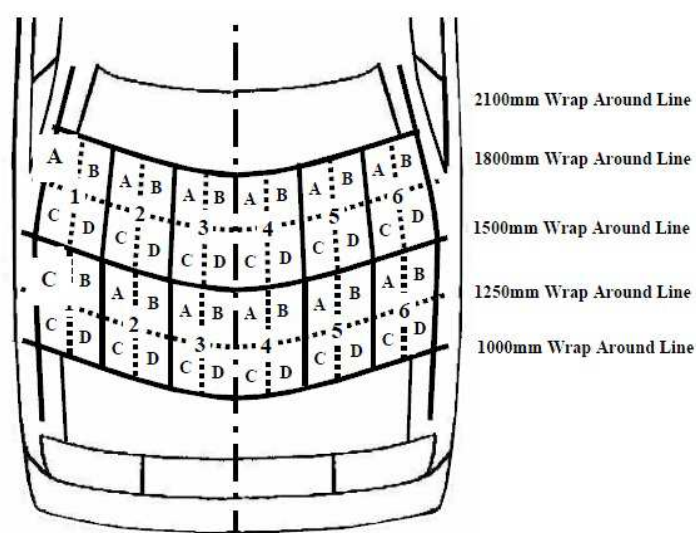


Figura 5.4. División del capó en sectores

5.2 Impactador

La misma normativa recoge las especificaciones de los impactadores de niño y adulto, que se detallan a continuación. Además estas especificaciones quedan recogidas en el informe del grupo 17 de la EEVC (European Enhanced Vehicle-safety Committee Working Group 17 Report) [17]

Los impactadores constan esencialmente de tres piezas: un núcleo central de aluminio, una base trasera, también de aluminio, unida al núcleo mediante 6 tornillos, y una piel artificial de PVC recubriendo el núcleo.

Las medidas de los impactadores quedan reflejadas en las figuras 5.5 y 5.6:

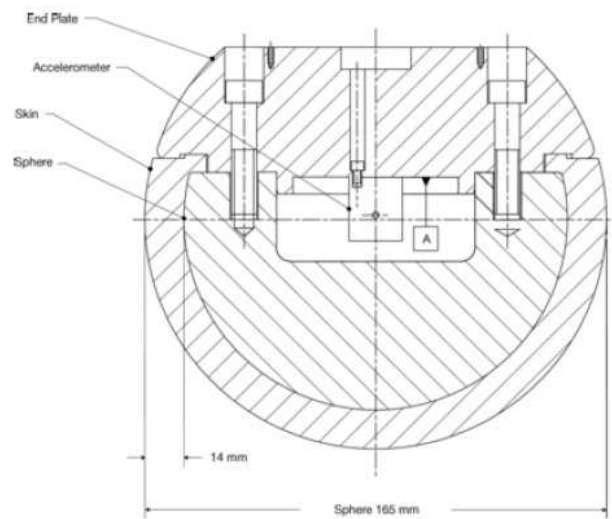


Figura 5.5. Impactador con forma de cabeza de adulto

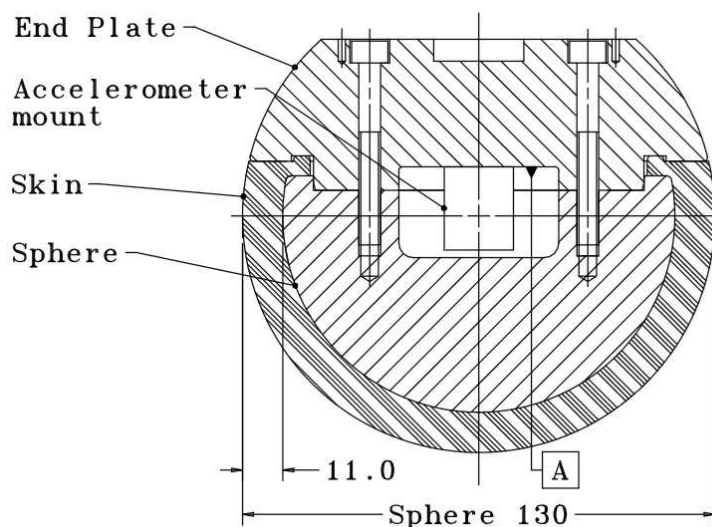


Figura 5.6. Impactador con forma de cabeza de niño

En el centro del impactador, se montarán los acelerómetros, encargados de recoger las aceleraciones sufridas por el impactador, y que posteriormente servirán para calcular el criterio de lesión cerebral. En ambos impactadores, el centro de gravedad debe estar en el centro de la esfera que los contiene, con un margen de error de 5 mm.

El peso de los impactadores de ser de $3,5 \pm 0,7kg$ para el caso del niño, y de $4,8 \pm 0,1kg$ para el del adulto, ambos incluyendo la instrumentación necesaria para el ensayo.

El momento de inercia en el eje que atraviesa el centro de gravedad y perpendicular a la dirección de impacto debe estar en un rango entre 0,008 y $0,012kg \cdot m^2$ para el caso del niño, y entre 0,010 y $0,013kg \cdot m^2$ para el del adulto.

En ambos casos la velocidad a la que debe ser lanzado el impactador es de 11,1m/s con un ángulo de inclinación de 25° con la vertical.

5.3 Condiciones de ensayo

Para reducir el tamaño del programa del test solamente se ensayan 12 puntos de impacto elegidos por euroNCAP. En el caso del ensayo con el impactador del niño, los puntos deberán estar al menos 65 mm dentro de las líneas de referencia laterales, y separadas entre sí, al menos 130 mm. En el caso del impactador de adulto los puntos elegidos deberán estar al menos 85 mm dentro de la zona delimitada por las líneas de referencia laterales, y separadas al menos 165 mm entre sí.

5.4 Cálculo de los criterios de lesiones

El HIC (Head Injury Criterion) se define como

$$HIC = (t_2 - t_1) \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} A_R \cdot dt}{(t_2 - t_1)} \right]^{2.5}$$

Siendo

$$A_R = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

Donde los instantes t_1 y t_2 son los que maximizan el valor del HIC.

Los valores del HIC cuyo intervalo de tiempo (t_2-t_1) es mayor de 15 ms son ignorados para el cálculo del máximo valor del HIC.

Dependiendo del valor del HIC, se pueden prever las lesiones que generaría un impacto sobre la cabeza de un peatón adulto o niño de acuerdo a las tablas 5.1 y 5.2.

HIC	AIS Code	Nivel de conmoción cerebral
100-519	1	dolor de cabeza o mareo
520-899	2	inconsciente menos de 1 hora- Fractura lineal
900-1254	3	inconsciente de 1 a 6 horas-Aplastamiento del cráneo
1255-1574	4	inconsciente de 6 horas a 1 día-Fractura abierta del cráneo
1575-1799	5	Inconsciente más de un día- Gran hematoma del cerebro
>1800	6	Imposible sobrevivir

Tabla 5.1. Clasificación AIS

HIC	AIS Code	Nivel de daño en el cráneo
<150	0-1	sin fractura
150-500	2	sin fractura
500-900	3	500-900 pequeña fractura
900-1800	4	900-1800 gran fractura
>1800	5	vida amenazada por la fractura

Tabla 5.2. Valoración euroNCAP

5.5 Valoración Global euroNCAP

De acuerdo con los valores obtenidos en los diferentes ensayos, se asigna una serie de colores y puntos de acuerdo a la tabla 5.3:

	Mín.	Máx.	Puntos
verde	0	650	1
amarillo	651	1000	0,75
naranja	1001	1350	0,5
marrón	1351	1700	0,25
rojo	1701		0

Tabla 5.3. Asignación colores y puntos euroNCAP

Cada uno de los impactos debe valorarse de acuerdo a esta tabla. El resultado obtenido debe ajustarse con un factor de corrección obtenido a su vez con la predicción aportada por el fabricante, y a su vez ponderada con el número total de zonas donde se ha realizado el test de impacto. La valoración máxima para este tipo de ensayo es de 24 puntos.

6 MODELOS DE SIMULACION

6.1 Vehículo

Para el presente proyecto se ha elegido el Chrysler Neon (Dodge Neon en Estados Unidos). El modelo es concretamente el 4 puertas sedán de 1996. Este vehículo se comercializó en Europa en sus diferentes versiones, desde 1994 hasta 2004.

El modelo de elementos finitos que se ha utilizado en este proyecto fue desarrollado por la NCAC (National Crash Analysis Center)[18] [19]. Consta de 336 partes, 283.859 nodos y 270.768 elementos, mayoritariamente tipo Shell.

Las figuras 6.1 a 6.4 son diferentes vistas del modelo empleado para la realización del presente proyecto.

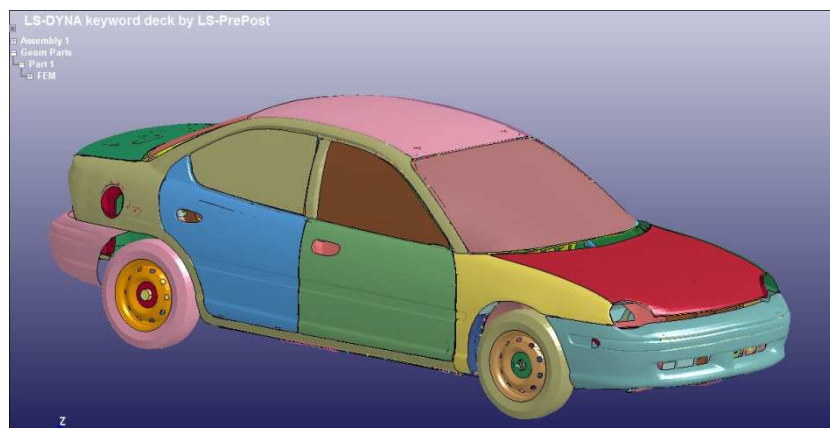


Figura 6.1. Chrysler Neon

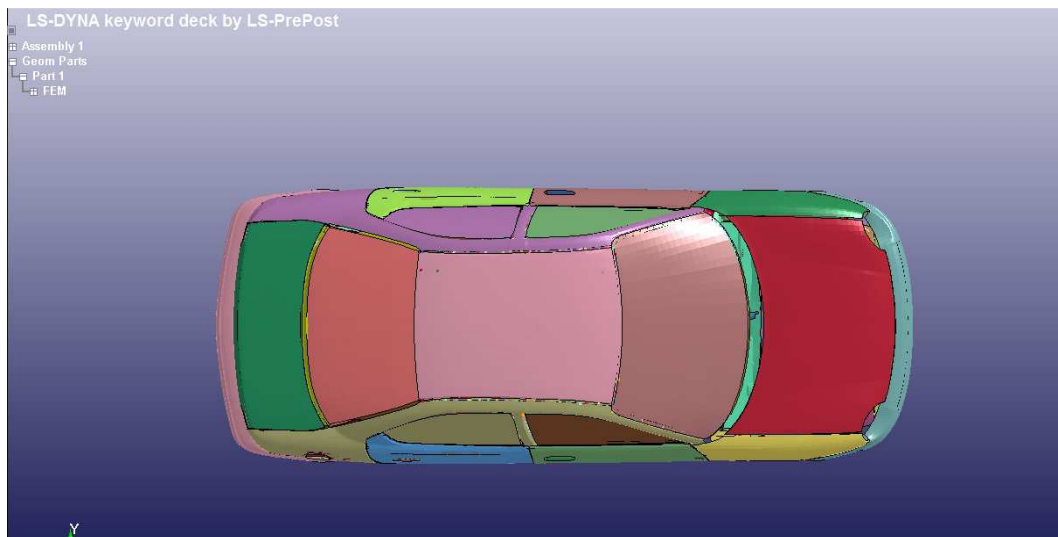


Figura 6.2. Chrysler Neon. Vista superior

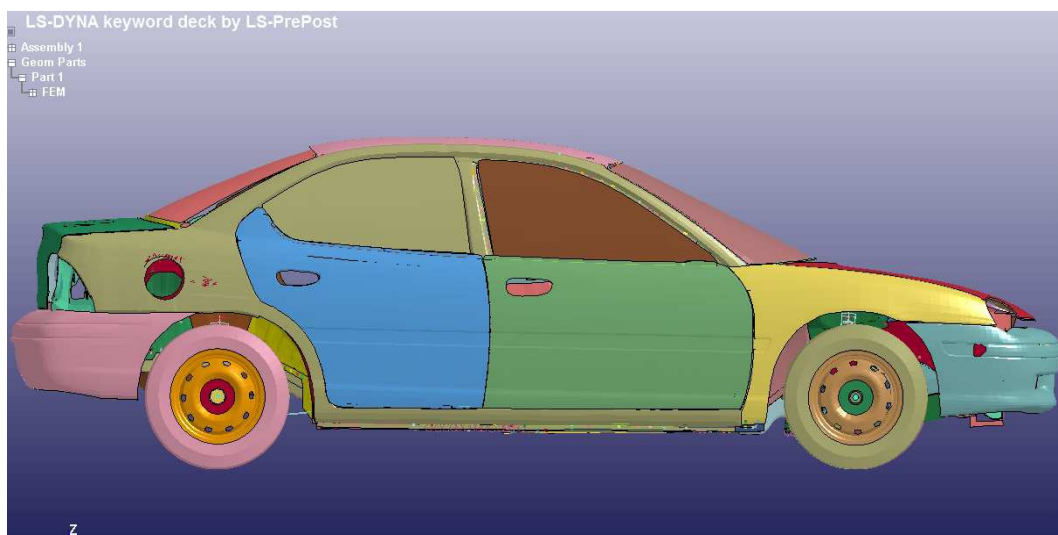


Figura 6.3. Chrysler Neon. Vista lateral

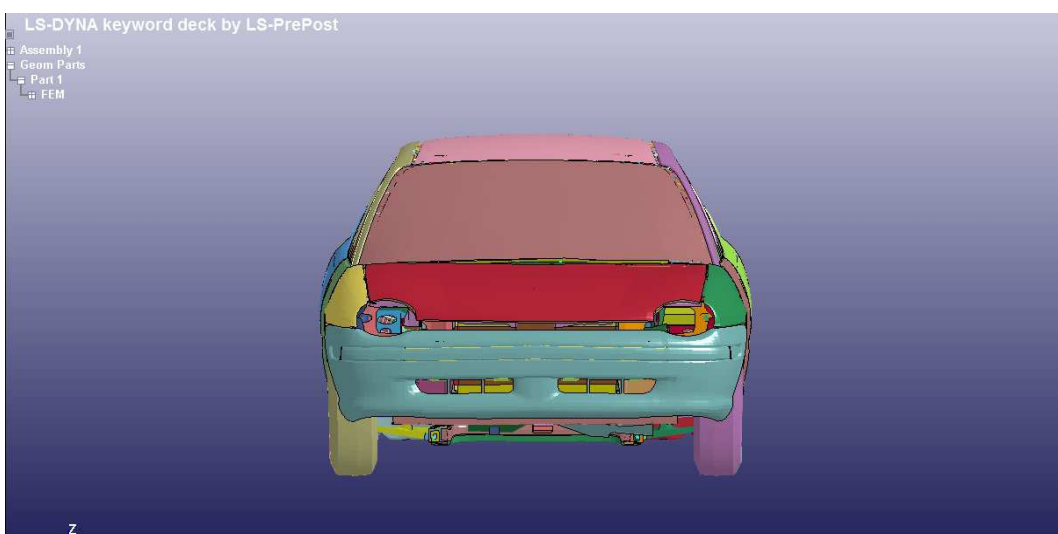


Figura 6.4. Chrysler Neon. Vista frontal

6.2 Modelo simplificado

El hecho diferencial de este proyecto consiste en el empleo de modelos de simulación simplificados. Al tratar de una prueba de impacto en la que intervienen de manera directa relativamente pocas piezas del automóvil, se ha intentado minimizar el número de piezas con las que se han realizado las simulaciones.

Al suprimir ciertas partes del modelo original, se han tenido que añadir nuevas condiciones de contorno y contactos para simular la rigidez con las que están ensambladas las partes del vehículo en el modelo original.

Este proceso tiene como objetivo reducir la potencia de cálculo necesaria y los tiempos de simulación que emplean los ordenadores. Esto podría suponer una optimización importante en este tipo de procesos.

6.2.1 Geometría

Las distintas partes del vehículo tienen una sección tipo SHELL con un espesor en los nodos de 5.

La figura 6.5 muestra todos los elementos del modelo empleados en las diferentes simulaciones. Las figuras 6.6 a 6.12 muestran cada uno de estos elementos por separado.

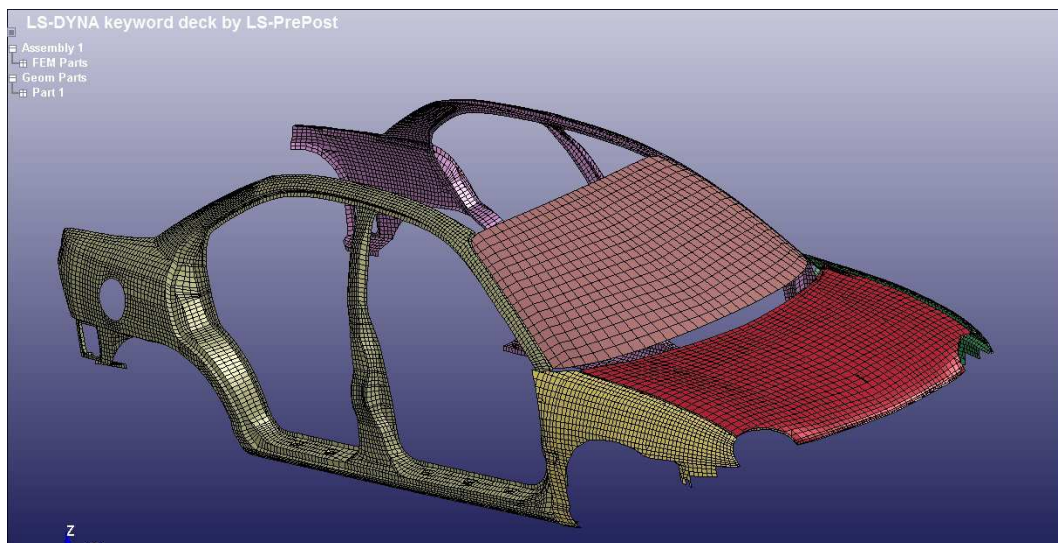


Figura 6.5. Modelo simplificado

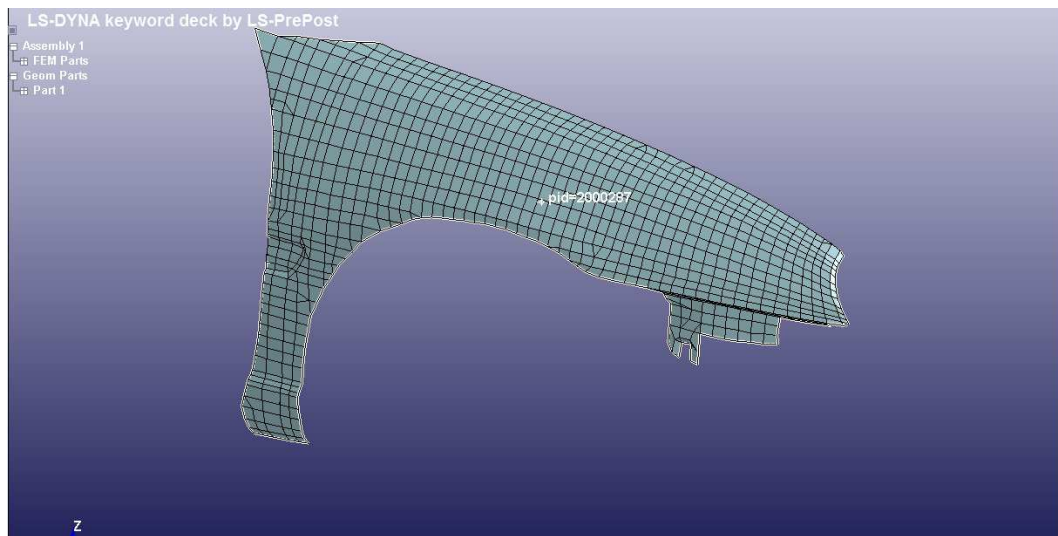


Figura 6.6. Modelo simplificado. Aleta derecha

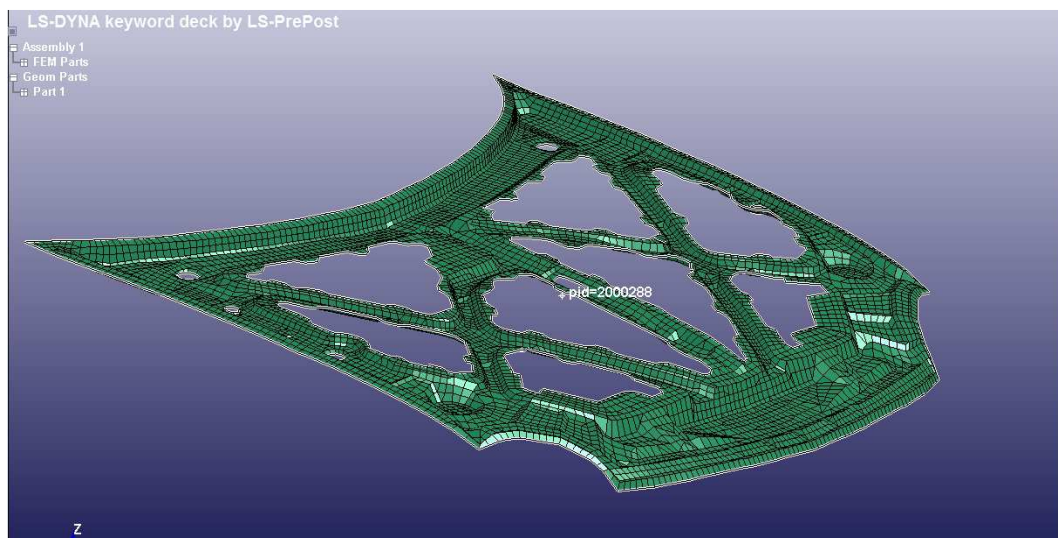


Figura 6.7. Modelo simplificado. Pieza interior del capó

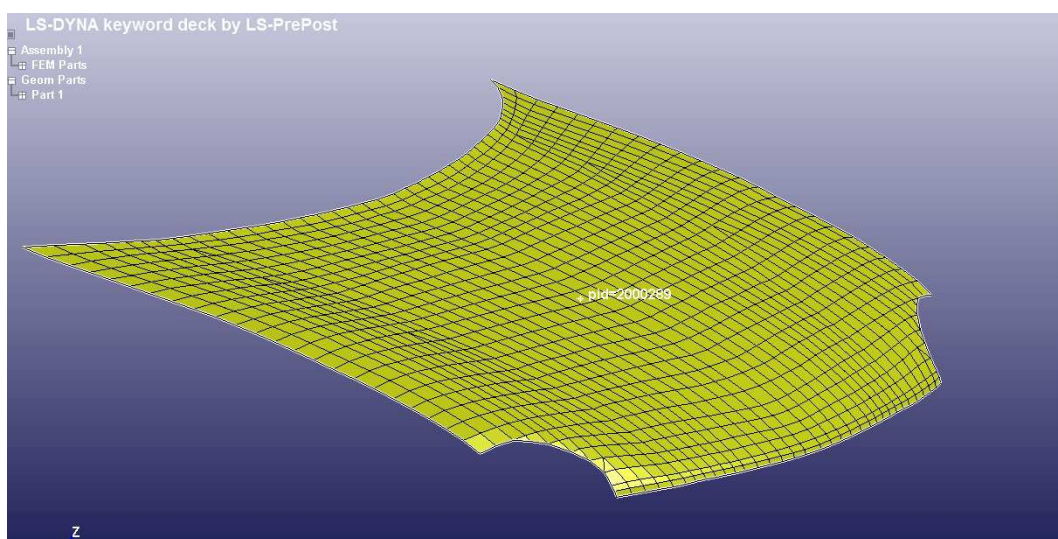


Figura 6.8. Modelo simplificado. Pieza exterior del capó

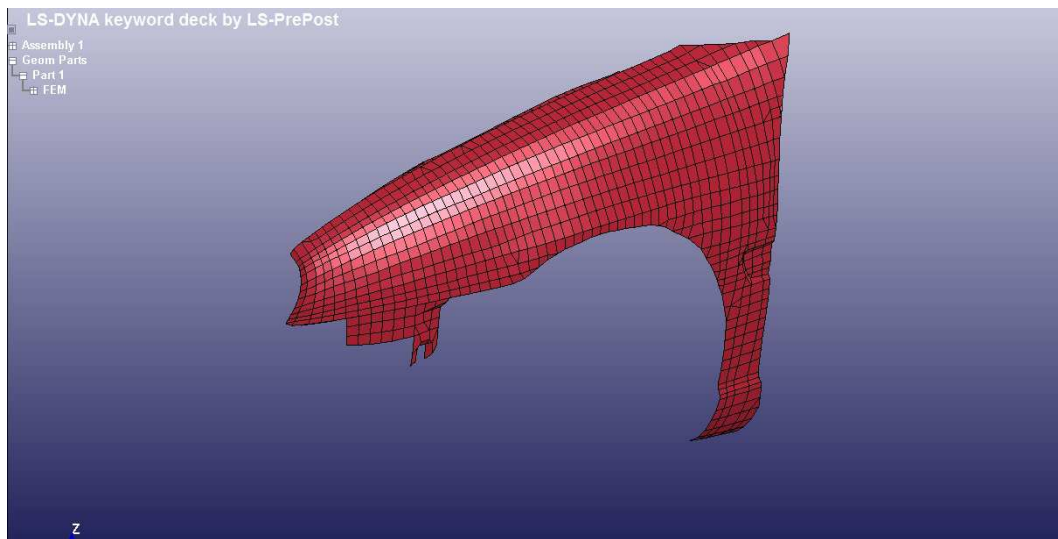


Figura 6.9. Modelo simplificado. Aleta izquierda

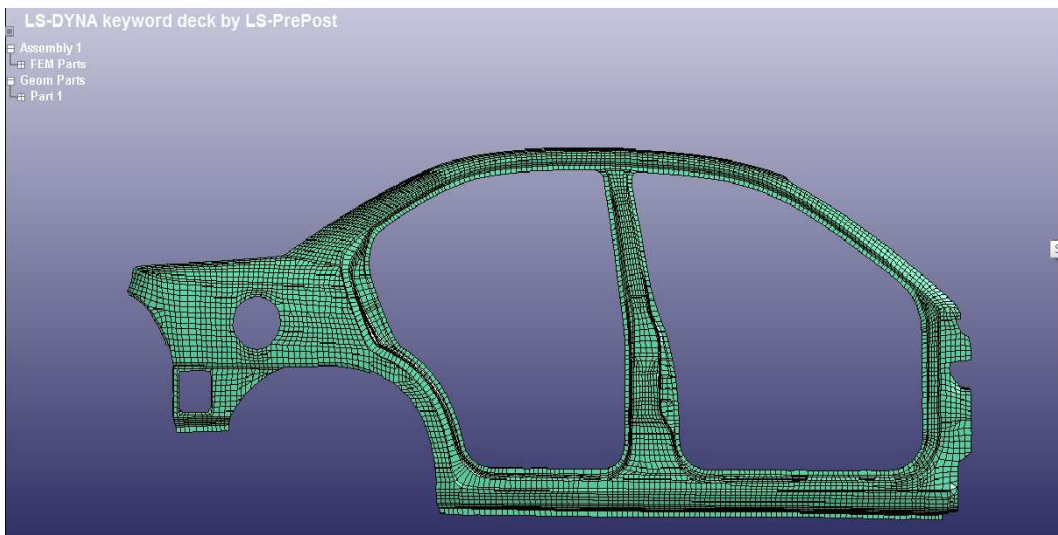


Figura 6.10. Modelo simplificado. Lateral derecho

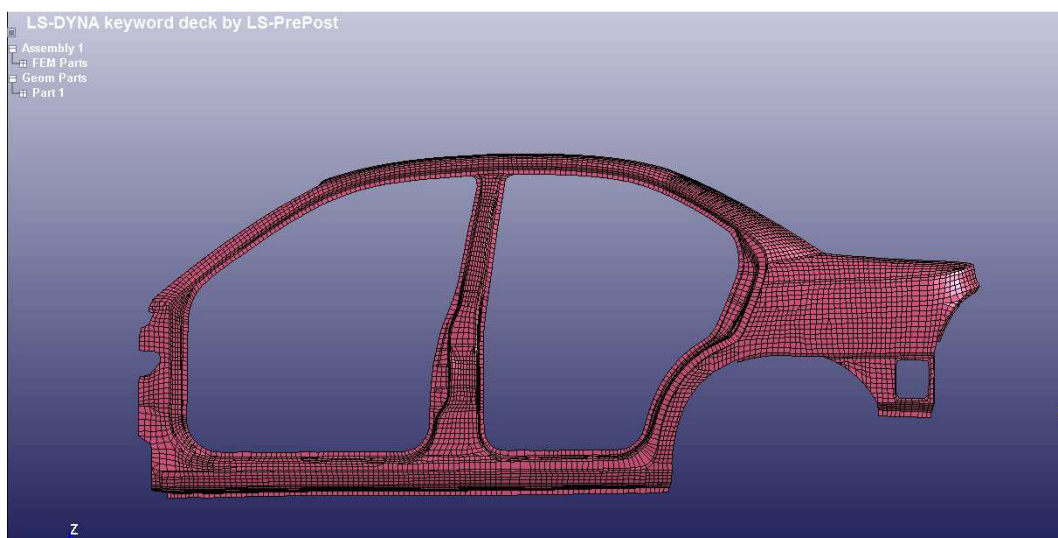


Figura 6.11. Modelo simplificado. Lateral izquierdo

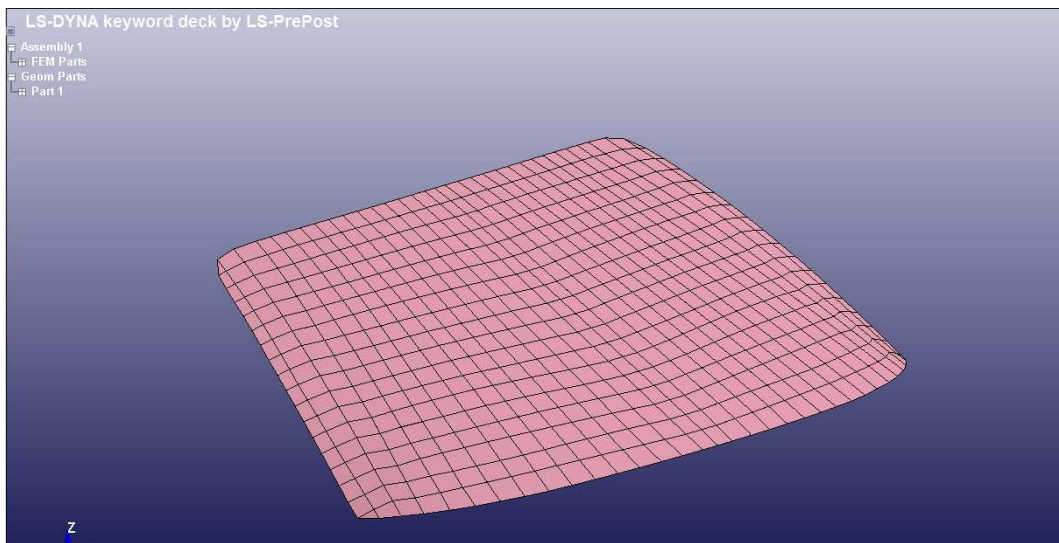


Figura 6.12. Modelo simplificado. Parabrisas

Las figuras 6.13 a 6.16 muestran las posibles combinaciones de los elementos usados en las simulaciones.

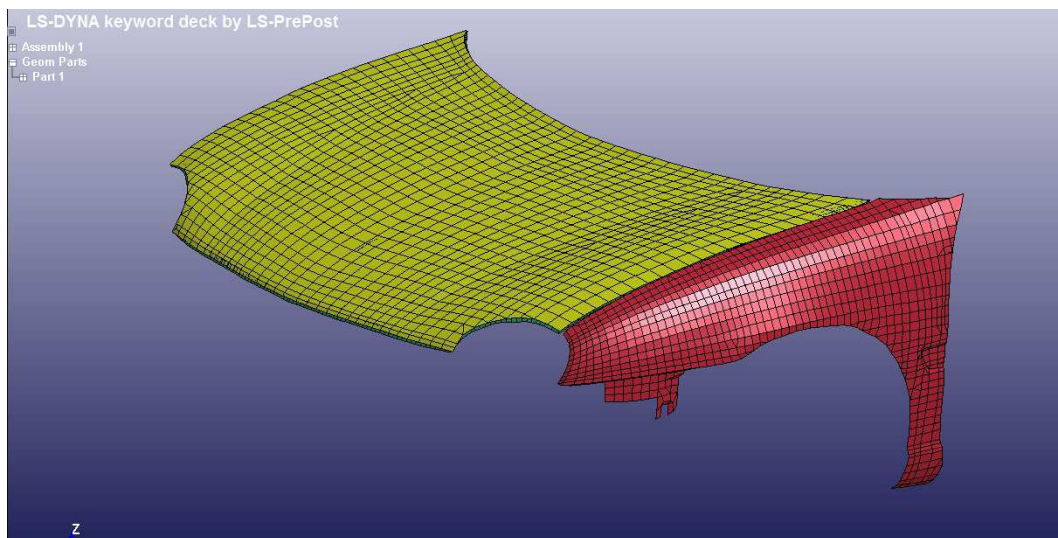


Figura 6.13. Modelo simplificado. Capó completo con aleta izquierda

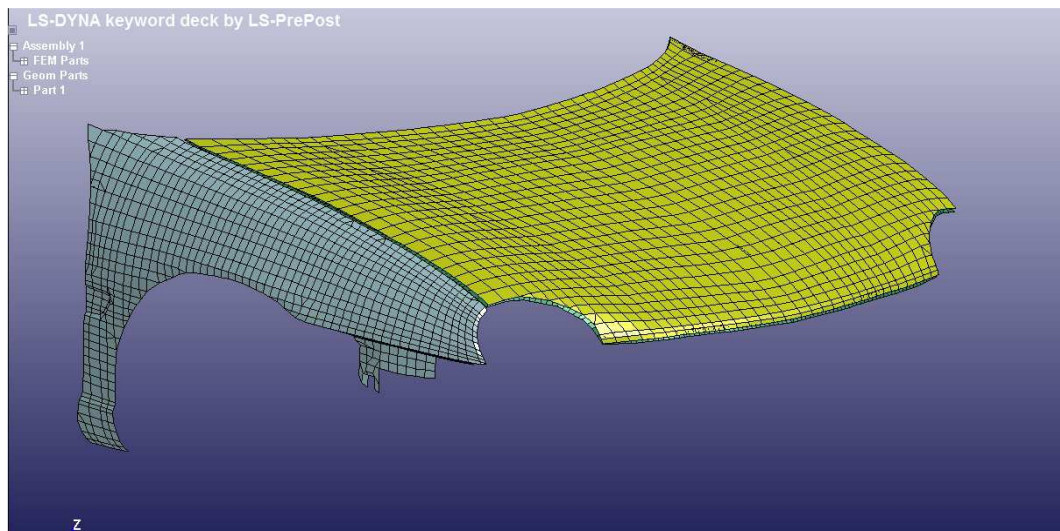


Figura 6.14. Modelo simplificado. Capó completo con aleta derecha

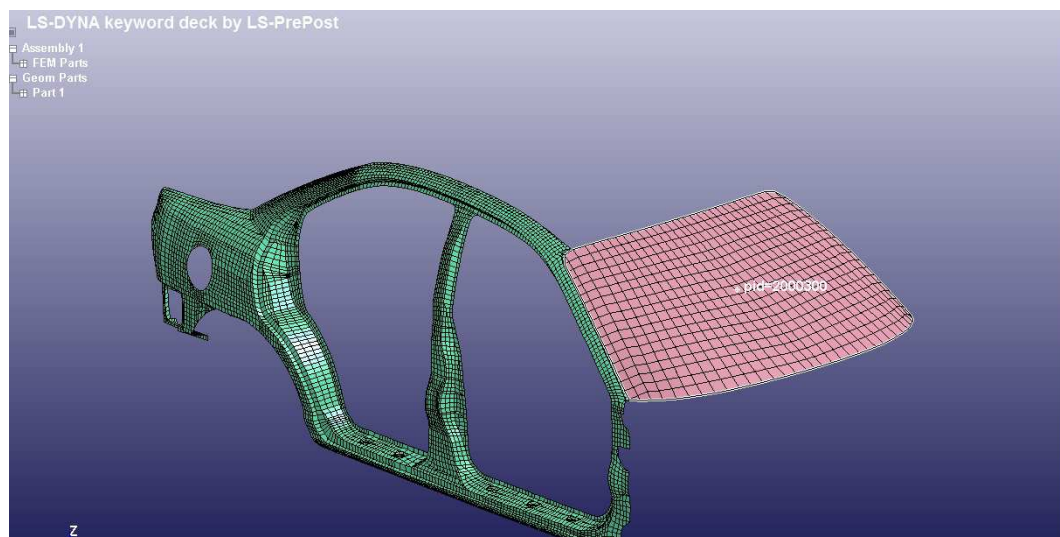


Figura 6.15. Modelo simplificado. Parabrisas con lateral derecho

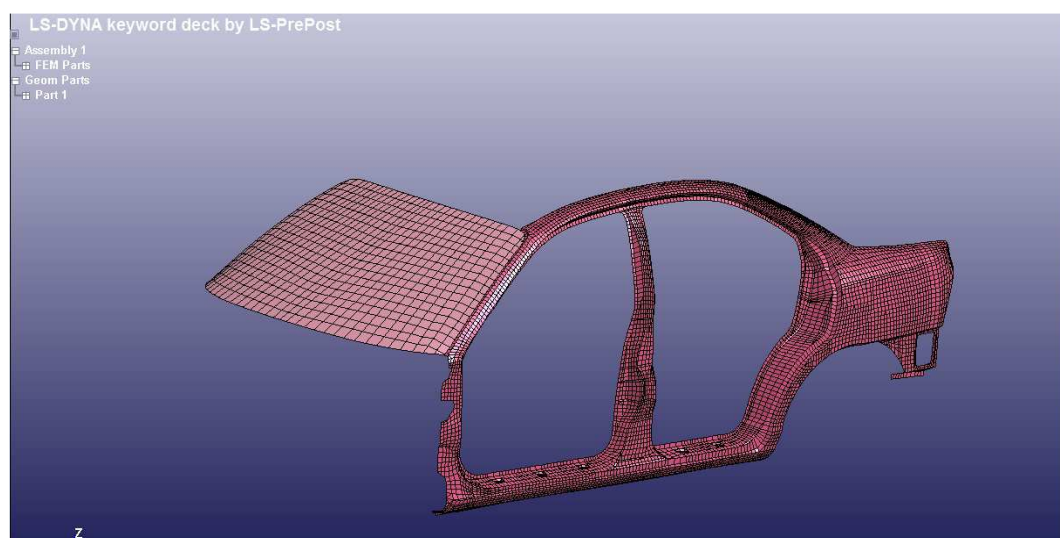


Figura 6.16. Modelo simplificado. Parabrisas con lateral izquierdo

6.2.2 Materiales

El tipo de material empleado en las partes del vehículo se corresponden con el tipo Piecewise linear plasticity, con las propiedades definidas en la tabla 6.1.

	densidad (kg/mm3)	Módulo de Young (Mpa)	coeficiente de Poisson	Límite de fluencia (Mpa)
Parabrisas	2,50E-009	7,60E+004	0,3	138
aleta izquierda	7,89E-009	2,10E+005	0,3	300
aleta derecha				
lateral derecho	7,89E-009	2,10E+005	0,3	300
lateral izquierdo				
interior capo	7,89E-009	2,10E+005	0,3	300
exterior capo				

Tabla 6.1. Tabla de materiales del modelo de automóvil ensayado

El material empleado en el diseño de las piezas empleadas del modelo (salvo el parabrisas) se corresponde con un acero convencional un límite elástico relativamente bajo con respecto a otros aceros empleados en la fabricación del automóvil. La elección de este tipo de acero, es fundamental en términos de seguridad y protección al peatón, ya que su bajo límite elástico permite la deformación en caso de impacto, absorbiendo la energía de la colisión, y reduciendo los daños ocasionados al peatón.

6.2.3 Gravedad

Todos los nodos del vehículo están sometidos al efecto de la gravedad, caracterizándolo mediante el comando LOAD BODY Z. Se le añade a cada nodo una aceleración vertical en sentido descendente con valor de 9.810 m/s^2 . La curva de aceleración queda definida mediante el comando DEFINE CURVE.

6.2.4 Contactos

Los contactos definidos para las distintas partes del automóvil son del tipo AUTOMATIC SINGLE SURFACE.

Al simplificar el modelo, ha sido necesario fijar ciertos nodos de las distintas partes del coche para evitar desplazamientos en la simulación, que no se corresponderían con la realidad. Para ello se le han aplicado restricciones tanto de giro como de desplazamiento a los nodos que servirán de soporte a la pieza. Estas condiciones de contorno se realizan mediante el comando SPC, fijando tanto los desplazamientos como los giros en los tres ejes como se muestra en la figura 6.17.

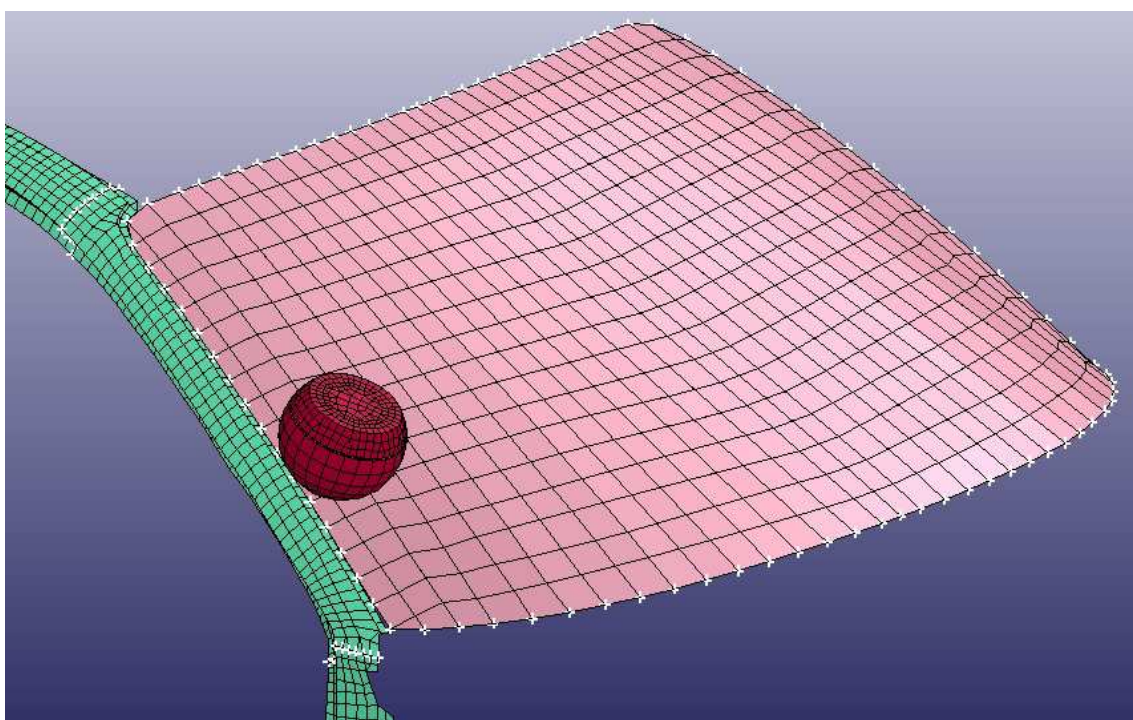


Figura 6.17. Ejemplo de fijaciones en los nodos

6.3 Impactador adulto

6.3.1 Geometría

Las distintas partes del impactador adulto tienen una sección tipo SHELL con un espesor en los nodos de 1.

Las dimensiones y materiales del impactador han sido obtenidas del European Enhanced Vehicle-safety Committee Working Group 17 Report [17], como se detalla en la figura 6.18.

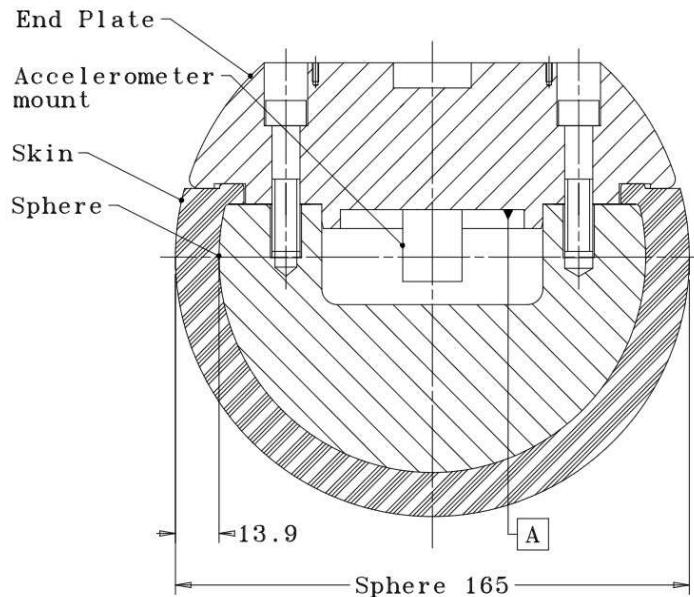


Figura 6.18. Dimensiones impactador adulto

Los mallados se han creado siguiendo una geometría sencilla, intentando optimizar el tamaño de los elementos de manera que sean lo suficientemente pequeños para garantizar una fiabilidad en los resultados, y a su vez, con un tamaño suficiente para no necesitar una potencia de cálculo excesiva en las simulaciones.

Las figuras 6.19 a 6.22 muestran el impactador desarrollado para las simulaciones, así como las diferentes partes que lo componen.

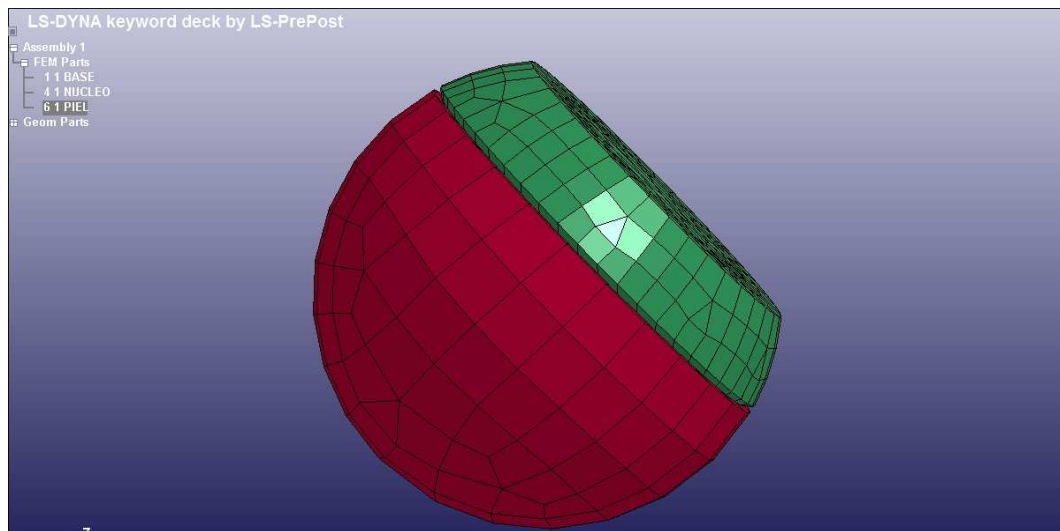


Figura 6.19. Impactador adulto completo

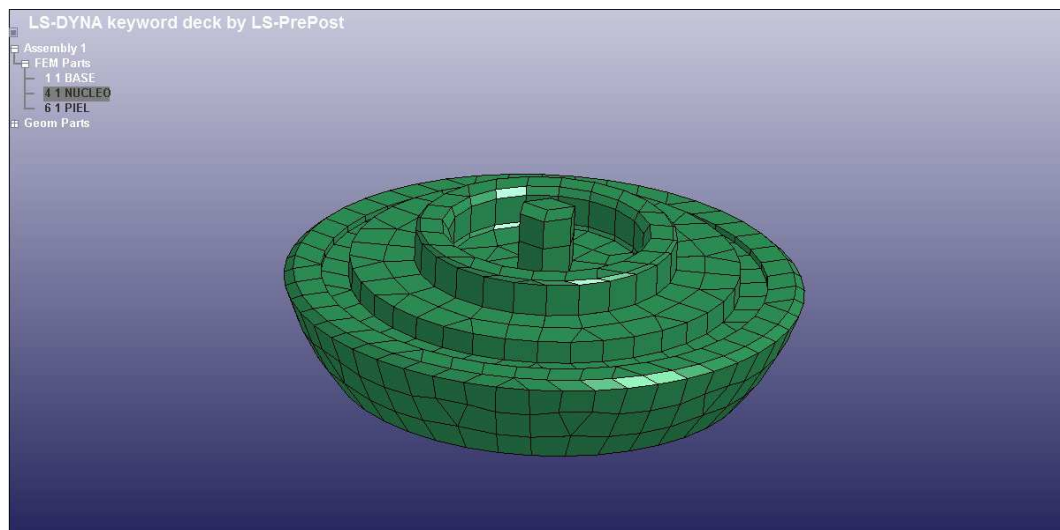


Figura 6.20. Base impactador adulto

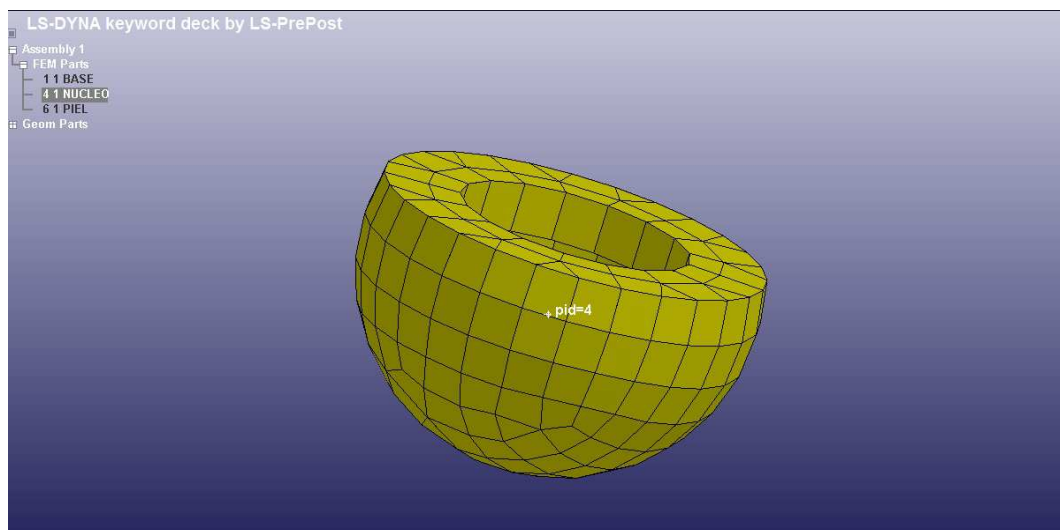


Figura 6.21. Núcleo impactador adulto

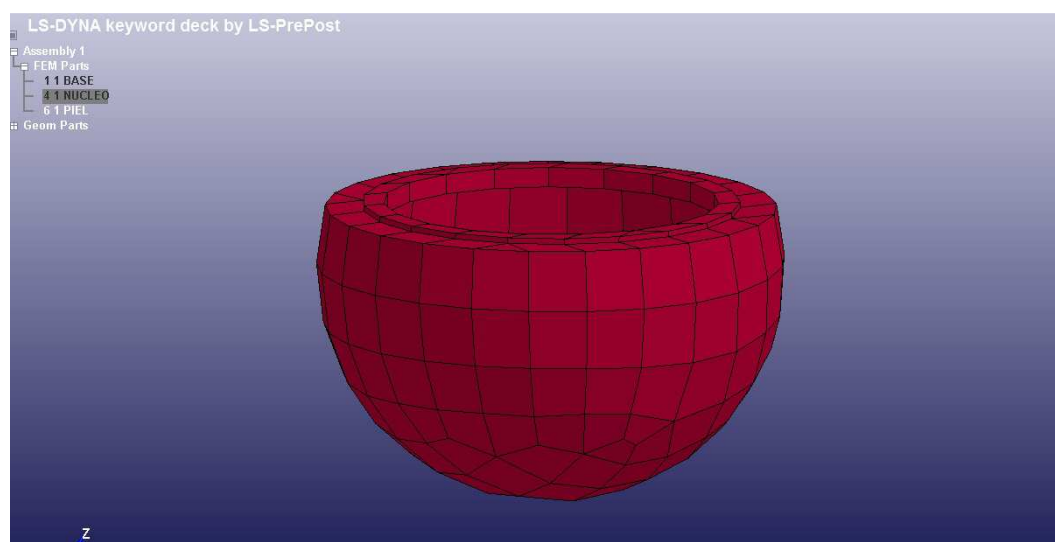


Figura 6.22. Piel impactador adulto

6.3.2 Materiales

El tipo de material empleado para todas las partes del impactador adulto es Piecewise linear plasticity con las propiedades definidas en la tabla 6.2:

	densidad (kg/mm3)	Módulo de Young (Mpa)	coeficiente de Poisson	Límite de fluencia (Mpa)	Módulo tangente
piel (pvc)	1,45E-009	3,10E+004	0,38	0,55	1123
núcleo (aluminio)	2,86E-009	7,00E+004	0,33	145	2,63E+004
base(aluminio)					

Tabla 6.2. Tabla de materiales impactador adulto

6.3.3 Gravedad

Todos los nodos del vehículo están sometidos al efecto de la gravedad, caracterizándolo mediante el comando LOAD BODY Z. Se le añade a cada nodo una aceleración vertical en sentido descendente con valor de 9.810 m/s^2 . La curva de aceleración queda definida mediante el comando DEFINE CURVE.

6.3.4 Acelerómetros

De manera habitual, para medir las aceleraciones sufridas en el impactador, se crea un acelerómetro mediante el comando `ELEMENT SEATBEL ACCELEROMETER`.

Como punto diferencial de este proyecto, en este caso, no se crea el acelerómetro sino que registramos las aceleraciones sufridas por el nodo situado en el punto medio del pivote central de la base del impactador, que coincide con la situación de los acelerómetros en los modelos reales. Este registro se realiza mediante el comando `HISTORY NODE`.

6.3.5 Contactos

Los contactos definidos para las distintas partes del impactador adulto son del tipo `AUTOMATIC SINGLE SURFACE`.

6.3.6 Velocidad inicial

Mediante el comando `INVEL` se le aplica a todos los nodos de la base del impactador adulto una velocidad de 11.1m/s, descomponiendo en los ejes X y Z en función del ángulo de impacto. Esta velocidad queda definida en el protocolo de protección al peatón de Euroncap [3].

6.4 Impactador niño

6.4.1 Geometría

Las distintas partes del impactador niño tienen una sección tipo `SHELL` con un espesor en los nodos de 1.

Las dimensiones y materiales del impactador han sido obtenidas del European Enhanced Vehicle-safety Committee Working Group 17 Report [17], como se detalla en la figura 6.23.

Los mallados se han creado siguiendo una geometría sencilla, intentando optimizar el tamaño de los elementos de manera que sean lo suficientemente pequeños para garantizar una fiabilidad en los resultados, y a su vez, con un tamaño suficiente para no necesitar una potencia de cálculo excesiva en las simulaciones.

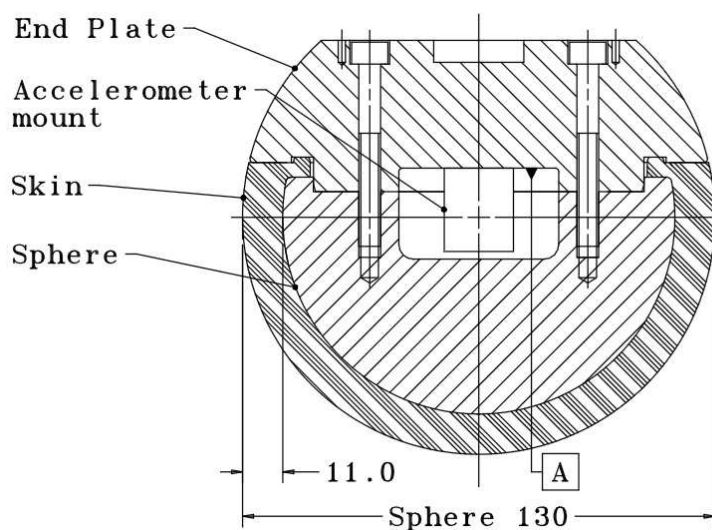


Figura 6.23. Dimensiones impactador niño

Las figuras 6.19 a 6.22 muestran el impactador desarrollado para las simulaciones, así como las diferentes partes que lo componen.

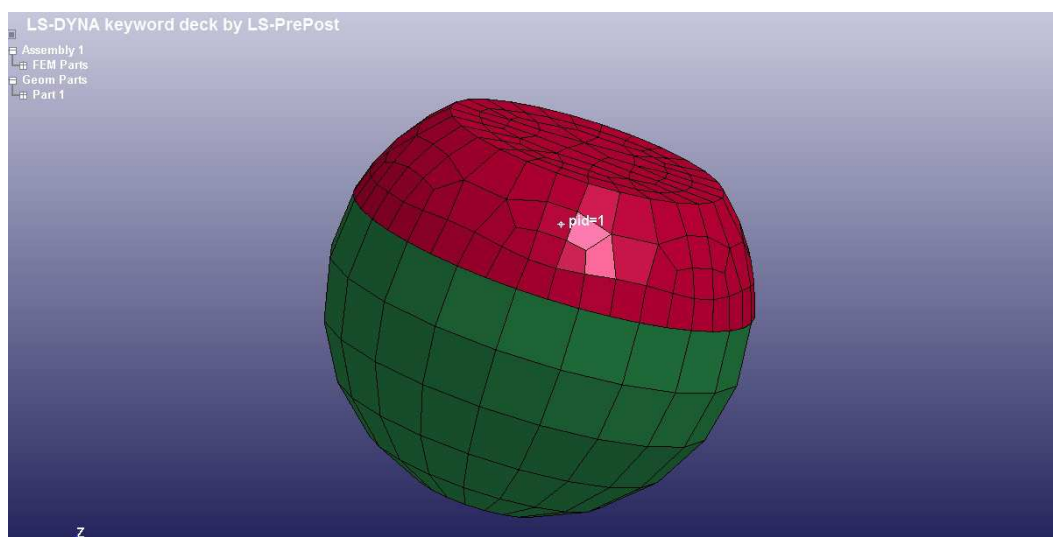


Figura 6.24. Impactador niño

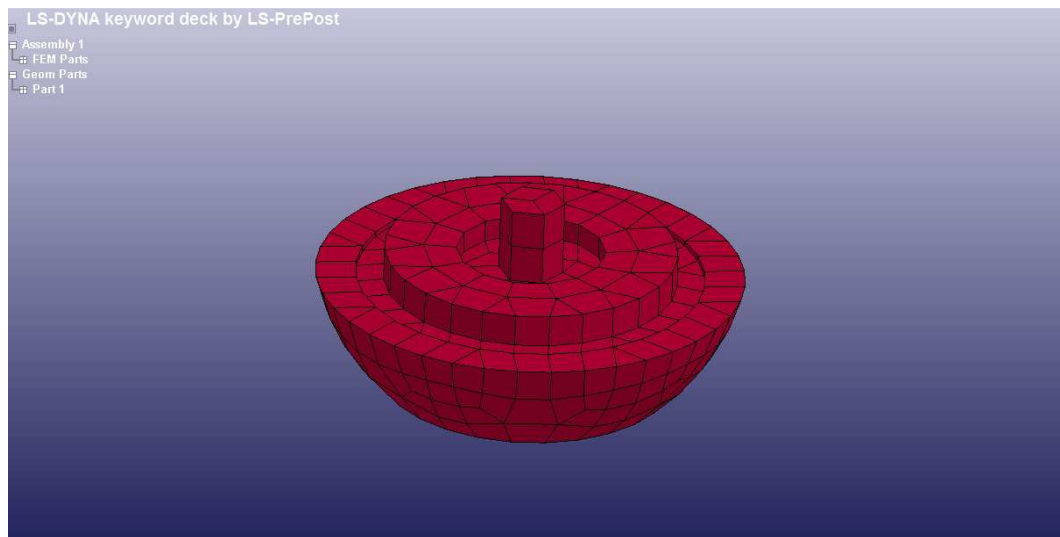


Figura 6.25. Base impactador niño

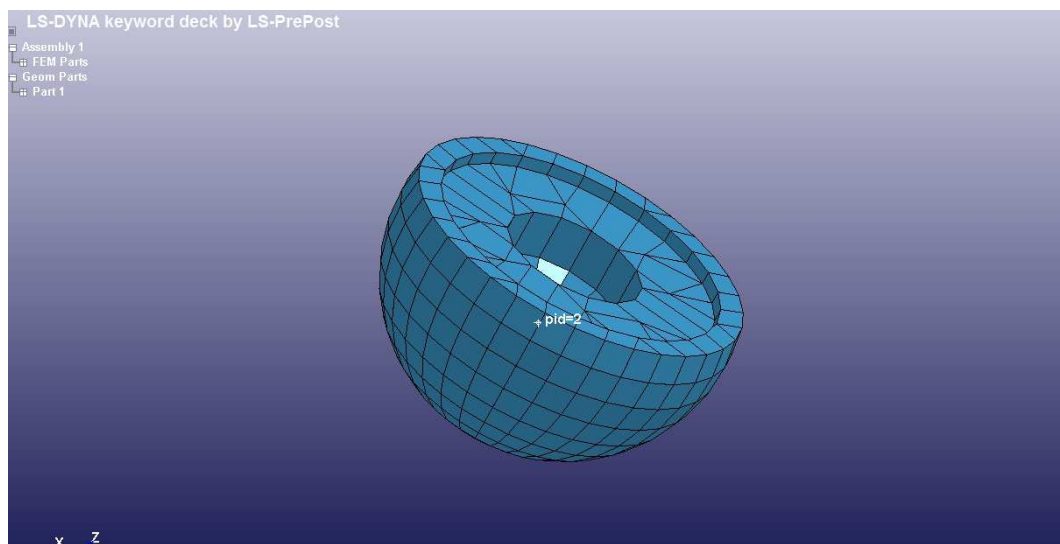


Figura 6.26. Núcleo impactador niño

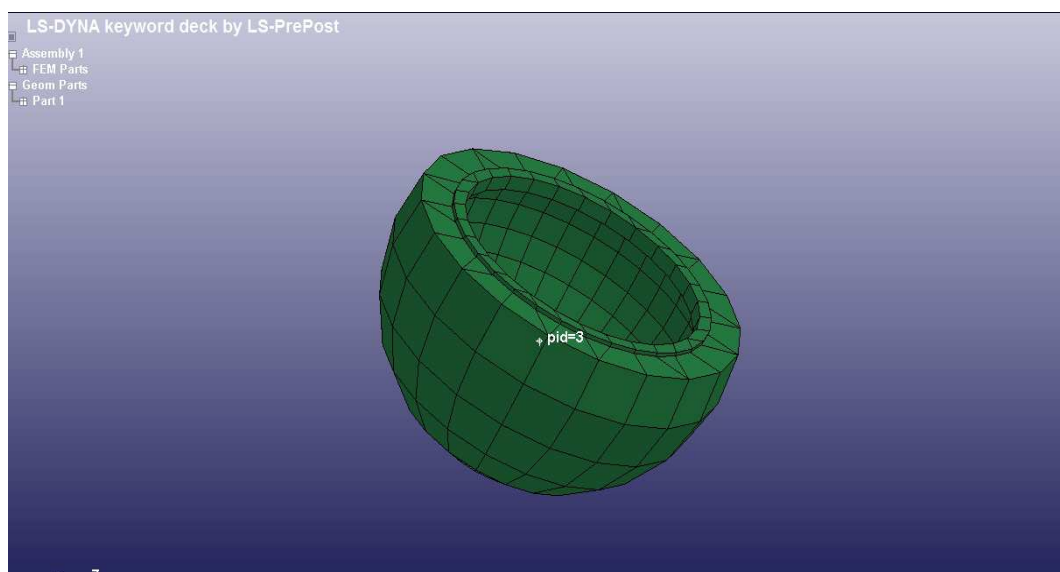


Figura 6.27. Piel impactador niño

6.4.2 Materiales

El tipo de material empleado para todas las partes del impactador niño es Piecewise linear plasticity con las propiedades definidas en la tabla 6.3.

	densidad (kg/mm3)	Módulo de Young (Mpa)	coeficiente de Poisson	Límite de fluencia (Mpa)	Módulo tangente
piel (pvc)	1,45E-009	3,10E+004	0,38	0,55	1123
núcleo (aluminio)	2,86E-009	7,00E+004	0,33	145	2,63E+004
base(aluminio)					

Tabla 6.3. Tabla de materiales impactador niño

6.4.3 Gravedad

Todos los nodos del vehículo están sometidos al efecto de la gravedad, caracterizándolo mediante el comando LOAD BODY Z. Se le añade a cada nodo una aceleración vertical en sentido descendente con valor de 9.810 m/s^2 . La curva de aceleración queda definida mediante el comando DEFINE CURVE

6.4.4 Acelerómetros

De manera habitual, para medir las aceleraciones sufridas en el impactador, se crea un acelerómetro mediante el comando ELEMENT SEATBEL ACCELEROMETER.

Como punto diferencial de este proyecto, en este caso, no se crea el acelerómetro sino que registramos las aceleraciones sufridas por el nodo situado en el punto medio del pivote central de la base del impactador, que coincide con la situación de los acelerómetros en los modelos reales. Este registro se realiza mediante el comando HISTORY NODE.

6.4.5 Contactos

Los contactos definidos para las distintas partes del impactador niño son del tipo AUTOMATIC SINGLE SURFACE.

6.4.6 Velocidad inicial

Mediante el comando INIVEL se le aplica a todos los nodos de la base del impactador niño una velocidad de 11.1m/s, descomponiendo en los ejes X y Z en función del ángulo de impacto. Esta velocidad queda definida en el protocolo de protección al peatón de Euroncap [3].

6.5 Tipos de impacto

La idea de simplificar los modelos ensayados, implica que en función de la posición del impactador en el impacto, se utilizarán modelos simplificados diferentes. En cada simulación de impacto solamente se utilizan las partes del vehículo más relevantes, quedando suprimidas el resto de las partes. Así, para las simulaciones de impacto en la parte más exterior del vehículo, además de las partes referentes al capó y parabrisas, se emplean las aletas laterales y los laterales del vehículo, desapareciendo estas últimas piezas en las simulaciones de los impactos más centrados.

La utilización de partes queda definida en la tabla 6.4 y en las figuras 6.28, 6.29, 6.30, 6.31, 6.32 y 6.33.

Tabla 6.4. Piezas utilizadas en cada simulación

ADULTO	
PARABRISAS Y LATERAL DERECHO	1A 1C
PARABRISAS	1B 2A 2B 3A 3B 4A 4B 5A 5B 6A
	1D 2C 2D 3C 3D 4C 4D 5C 5D 6C
PARABRISAS Y LATERAL IZQUIERDO	6A 6B

NIÑO	
CAPÓ INTERIOR Y EXTERIOR Y ALETA DERECHA	1A 1C
CAPÓ INTERIOR Y EXTERIOR	1B 2A 2B 3A 3B 4A 4B 5A 5B 6A
	1D 2C 2D 3C 3D 4C 4D 5C 5D 6C
CAPÓ INTERIOR Y EXTERIOR Y ALETA IZQUIERDA	6A 6B

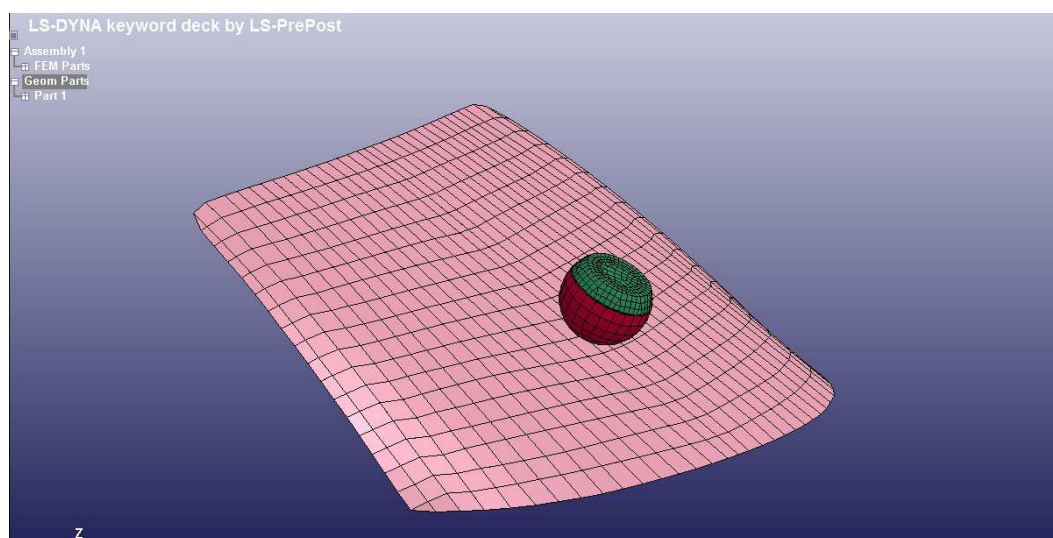


Figura 6.28. Impacto impactador adulto con parabrisas

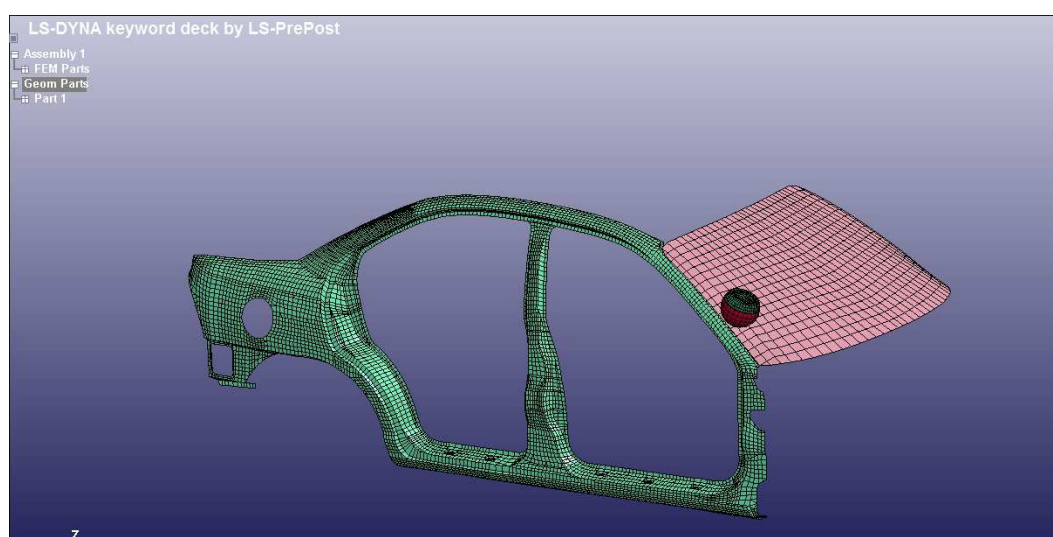


Figura 6.29. Impacto impactador adulto con parabrisas y lateral derecho

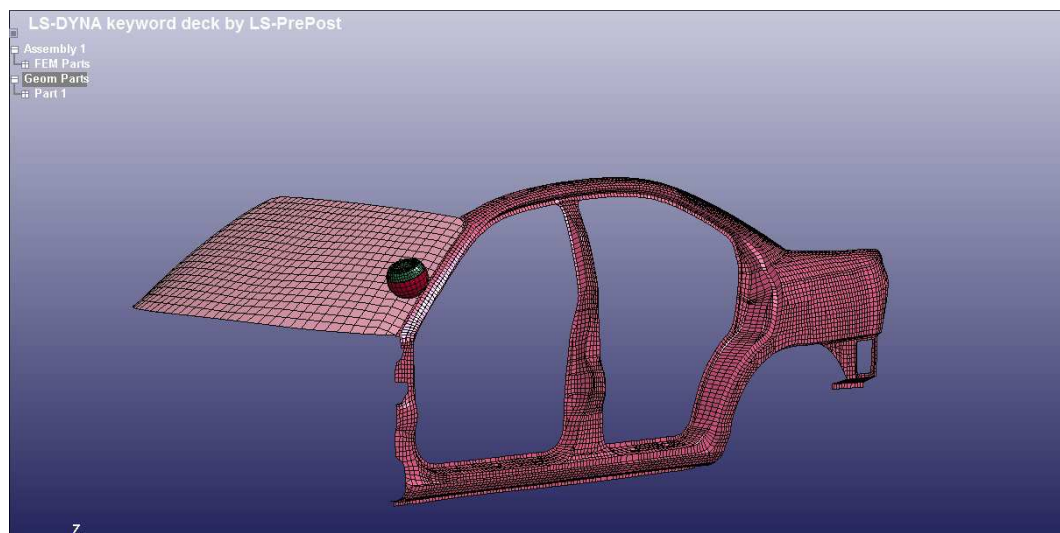


Figura 6.30. Impacto impactador adulto con parabrisas y lateral izquierdo

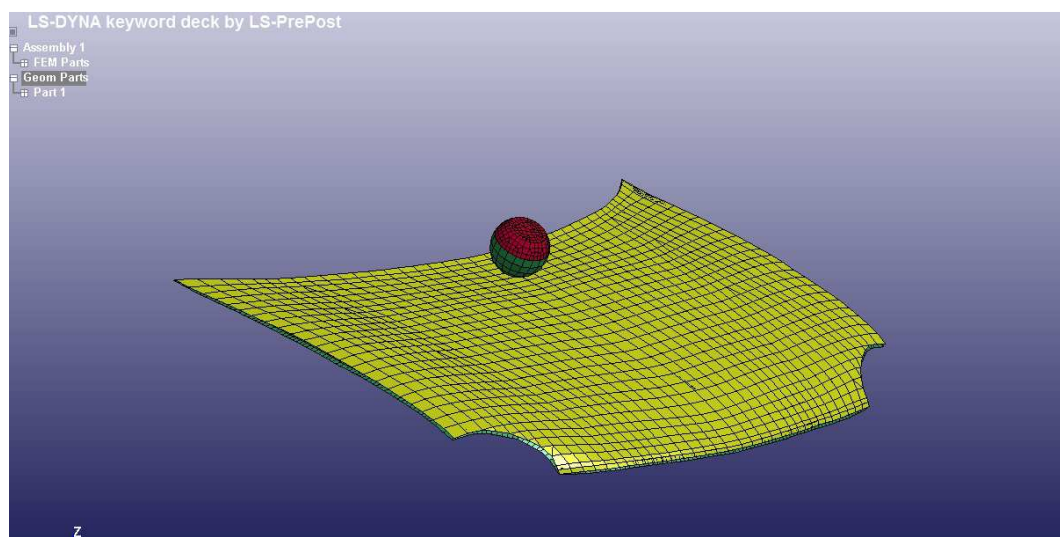


Figura 6.31. Impacto impactador niño con capó

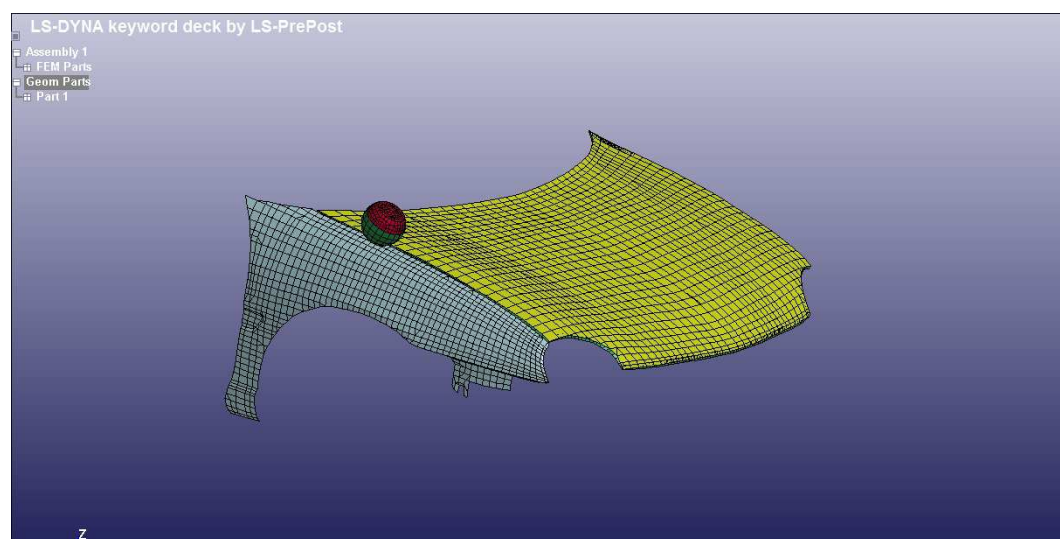


Figura 6.32. Impacto impactador niño con capó y aleta derecha

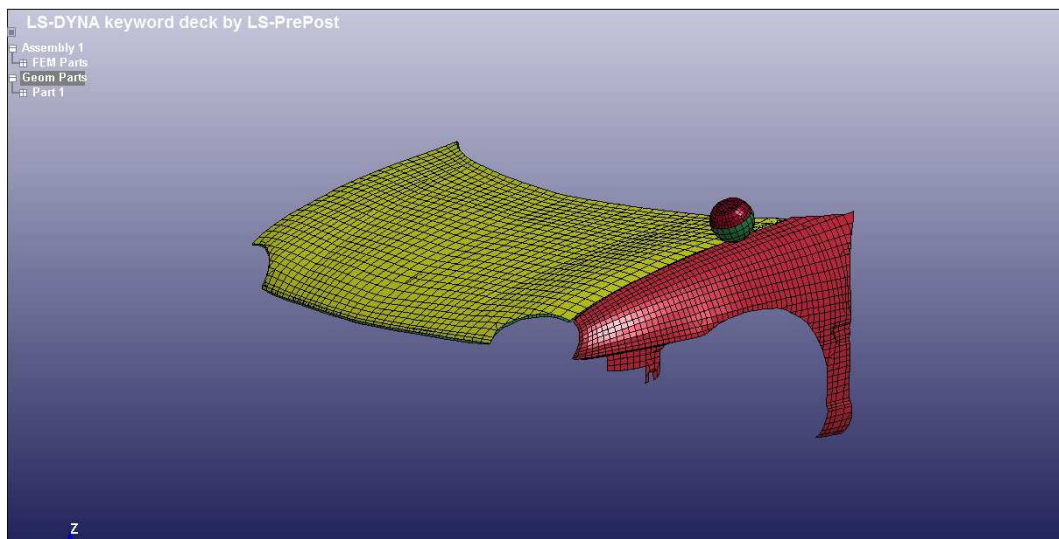


Figura 6.33. Impacto impactador niño con capó y aleta izquierda

7 RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones, tanto de niño como de adulto.

7.1 Adulto

Las figuras 7.1 a 7.24 muestran los resultados obtenidos en las simulaciones para los casos de ensayo con el impactador de adulto.

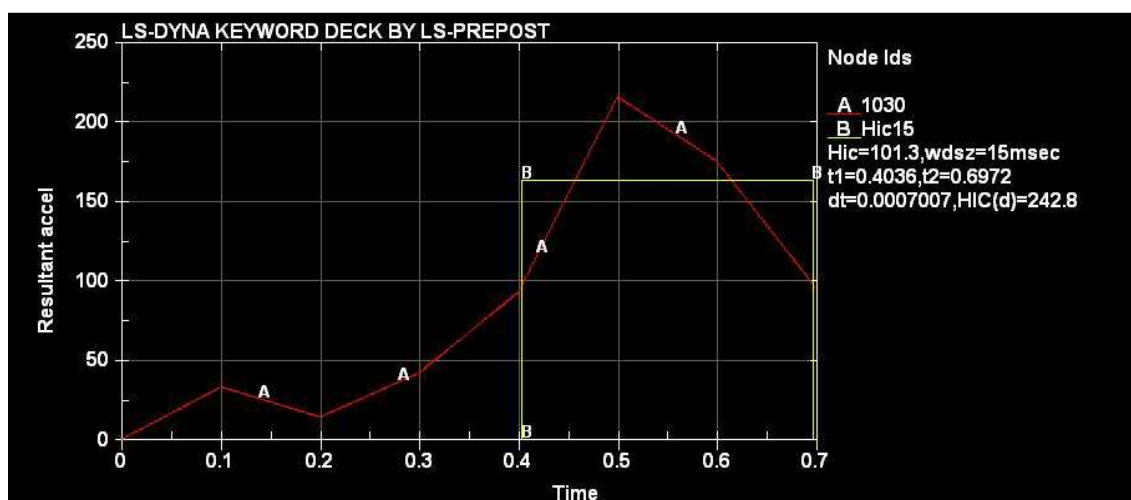


Figura 7.1. Impacto adulto 1A

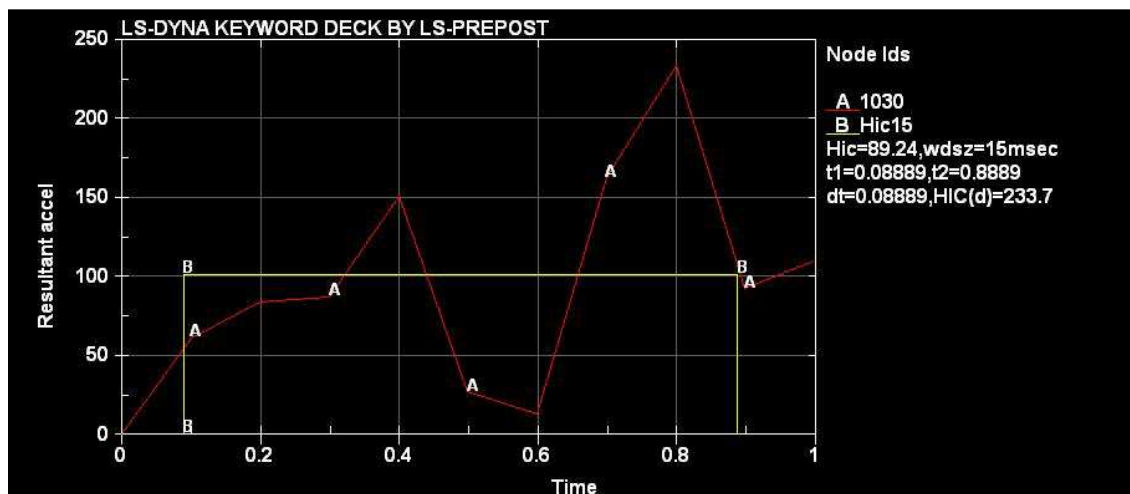


Figura 7.2. Impacto adulto 1B

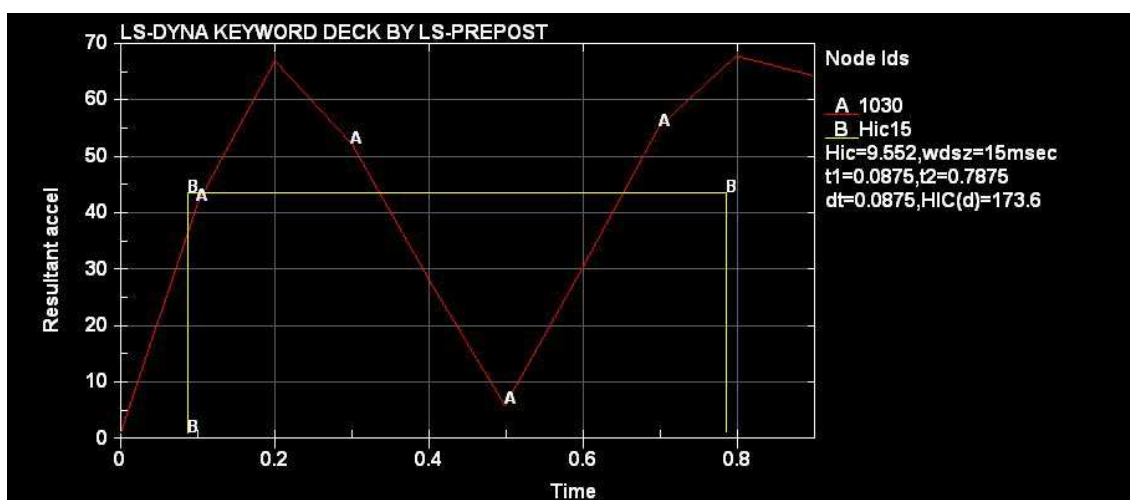


Figura 7.3. Impacto adulto 1C

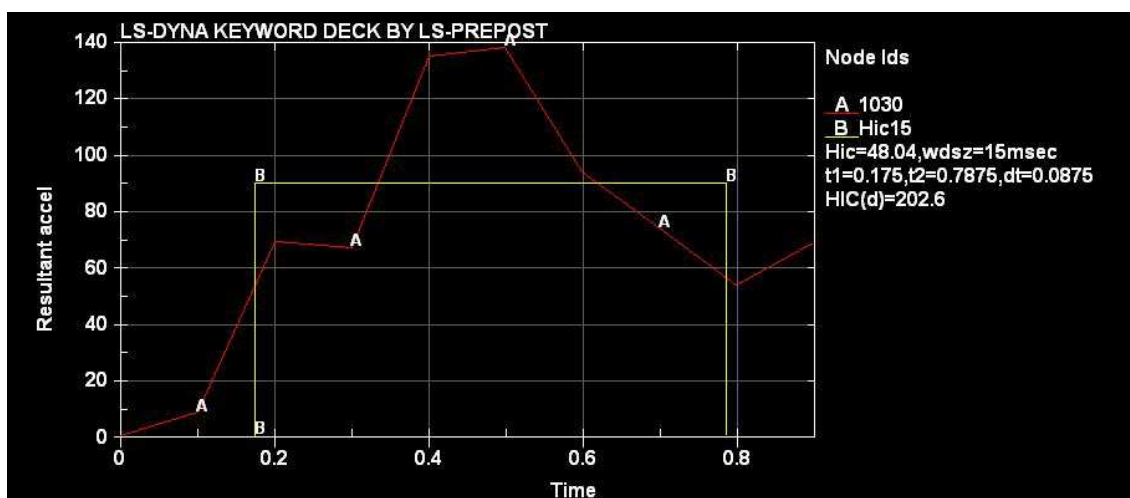


Figura 7.4. Impacto adulto 1D

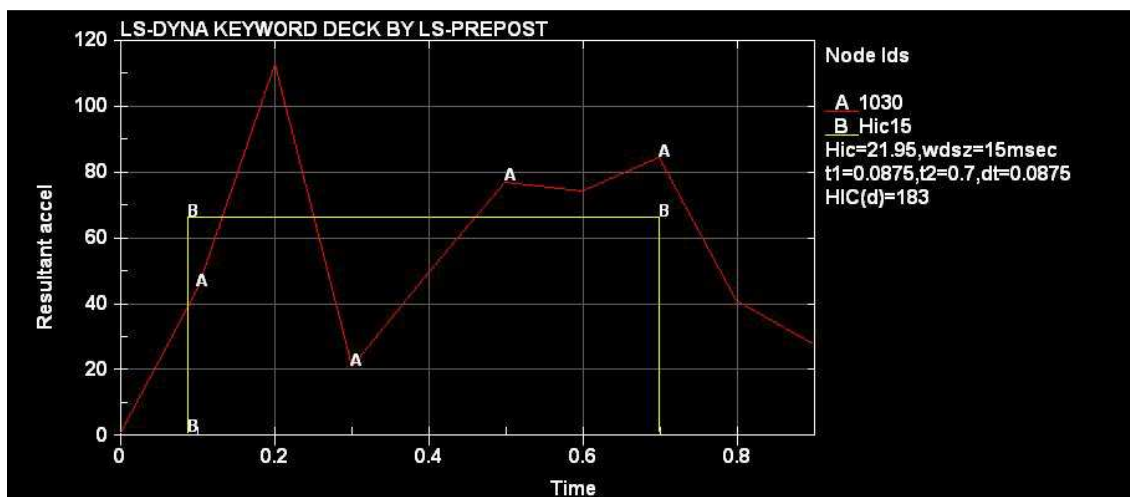


Figura 7.5. Impacto adulto 2A

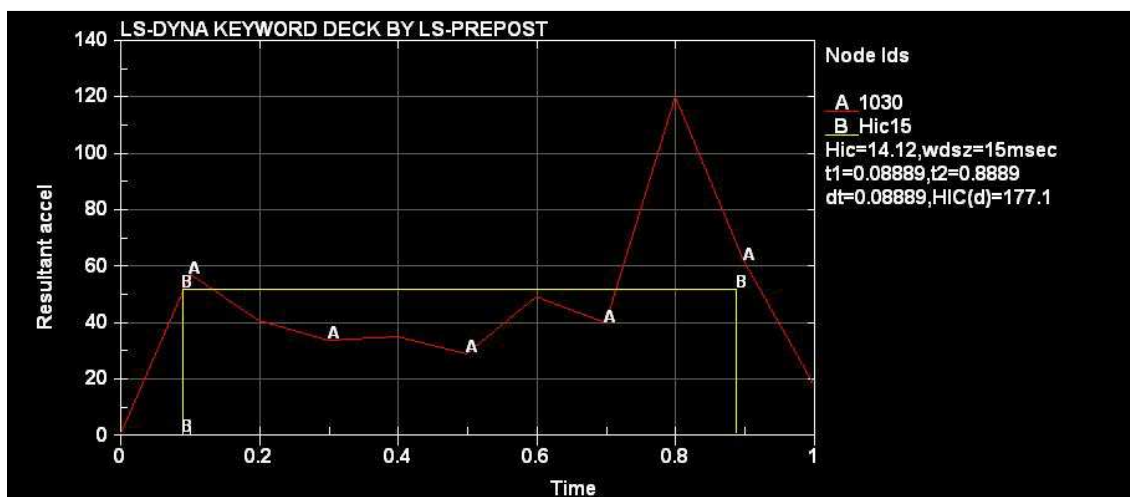


Figura 7.6. Impacto adulto 2B

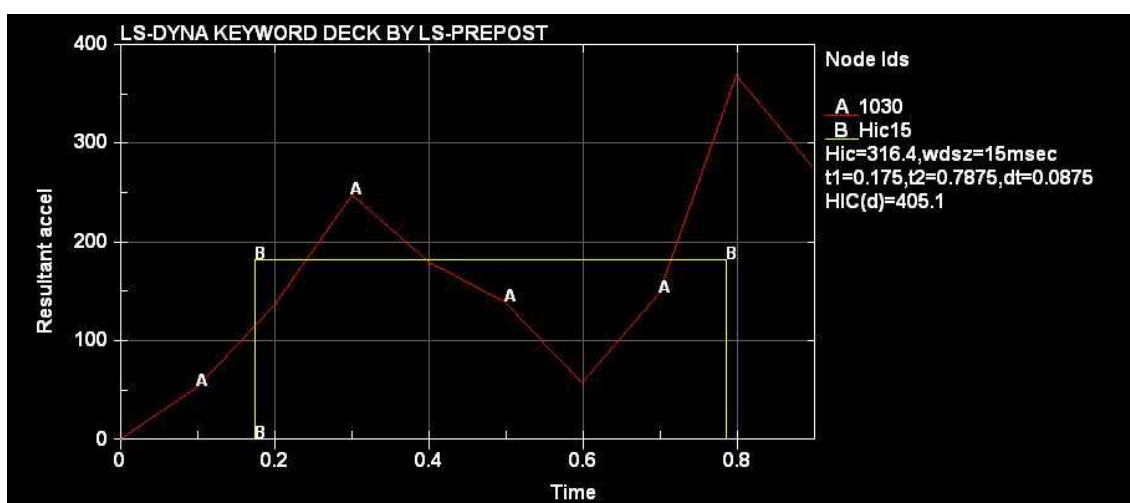


Figura 7.7. Impacto adulto 2C

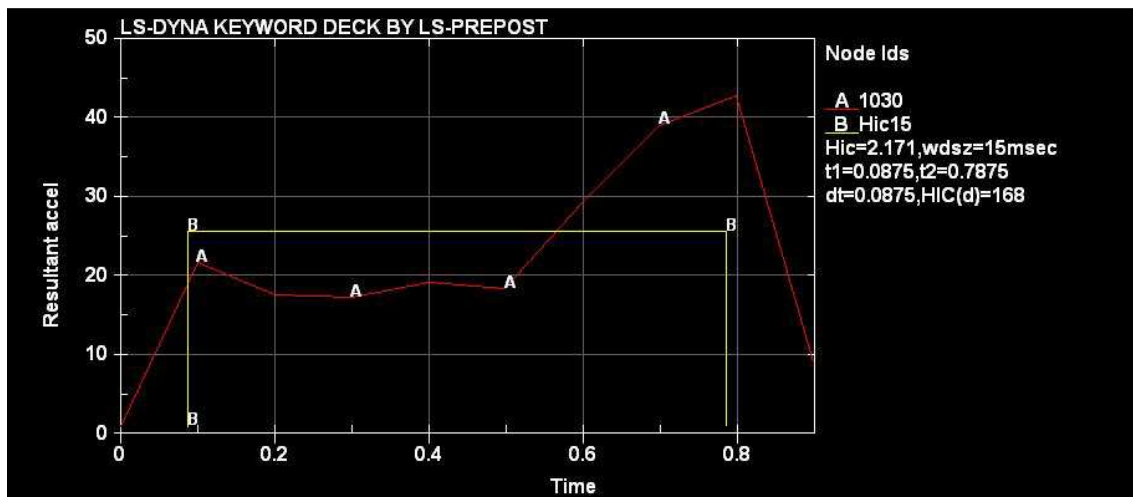


Figura 7.8. Impacto adulto 2D

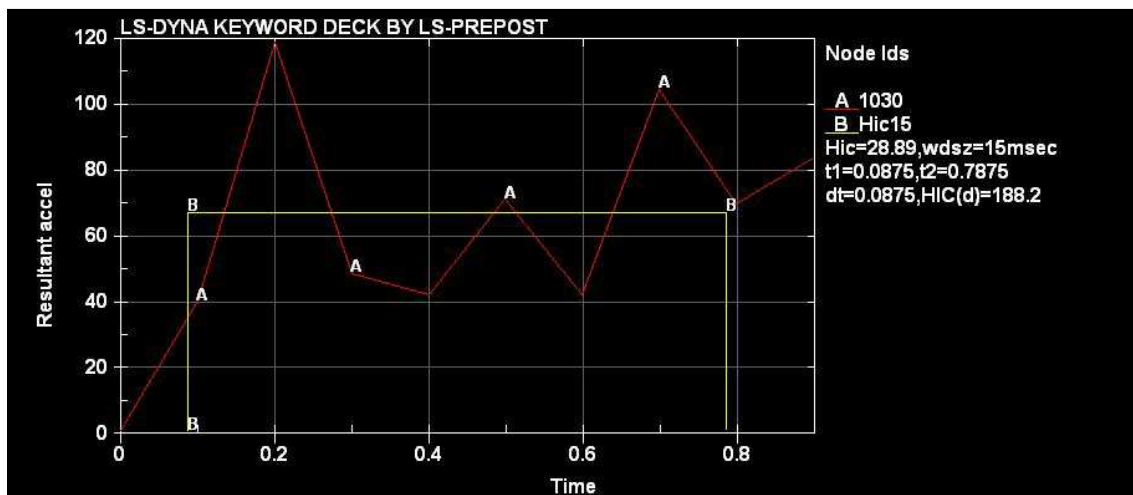


Figura 7.9. Impacto adulto 3A

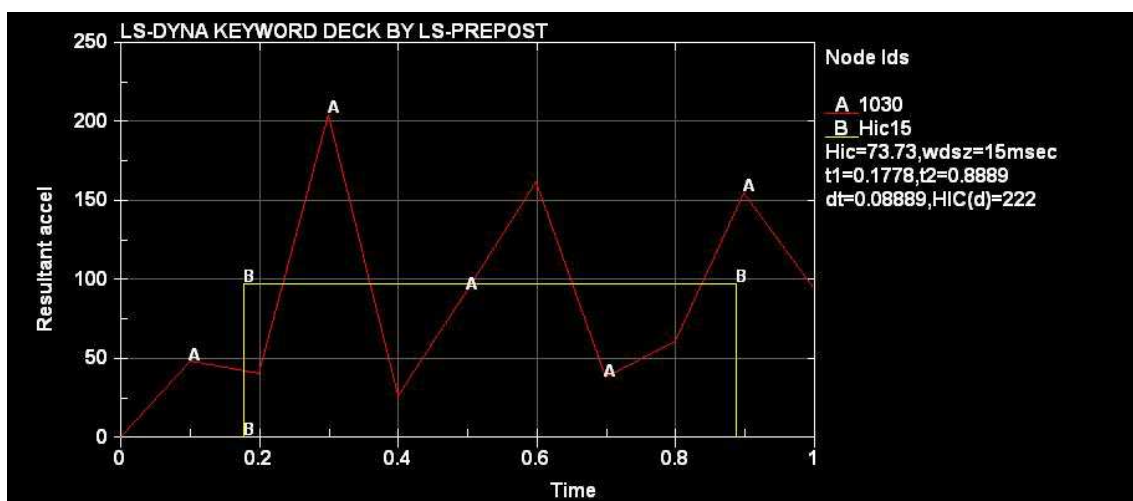


Figura 7.10. Impacto adulto 3B

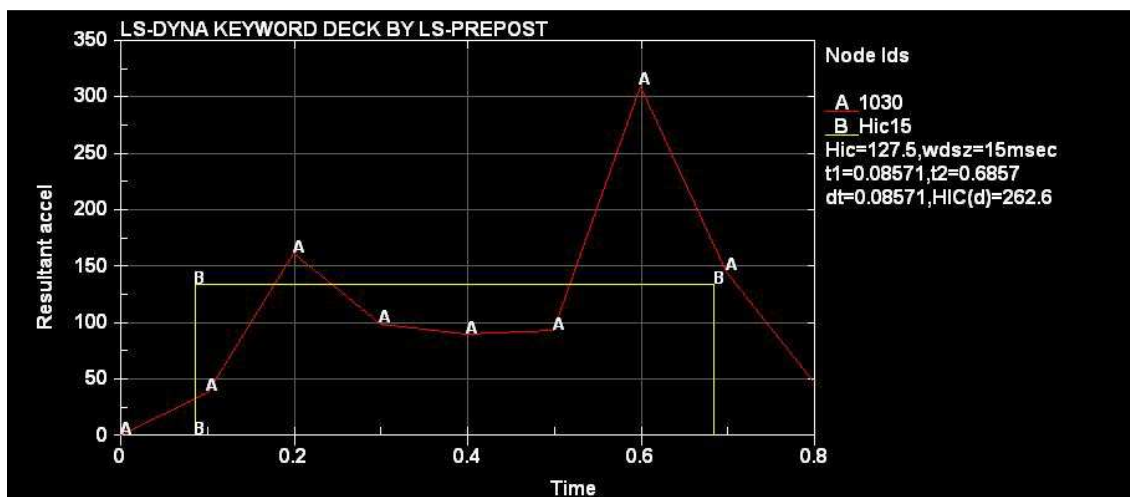


Figura 7.11. Impacto adulto 3C

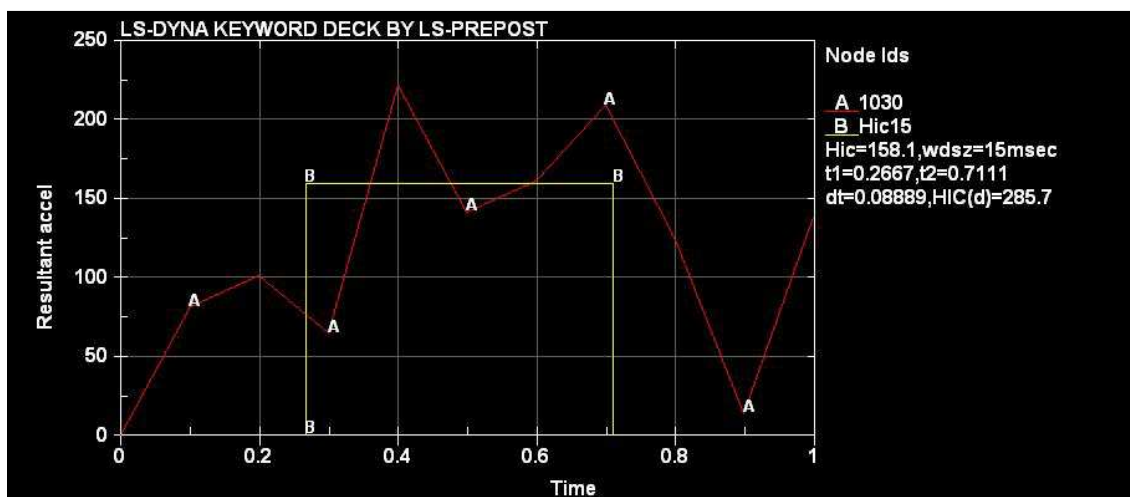


Figura 7.12. Impacto adulto 3D

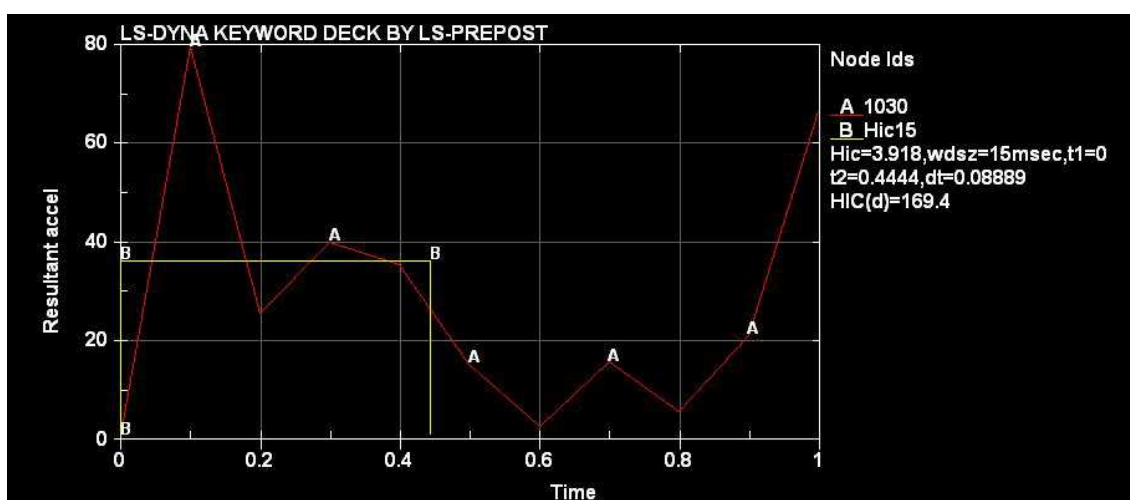


Figura 7.13. Impacto adulto 4A

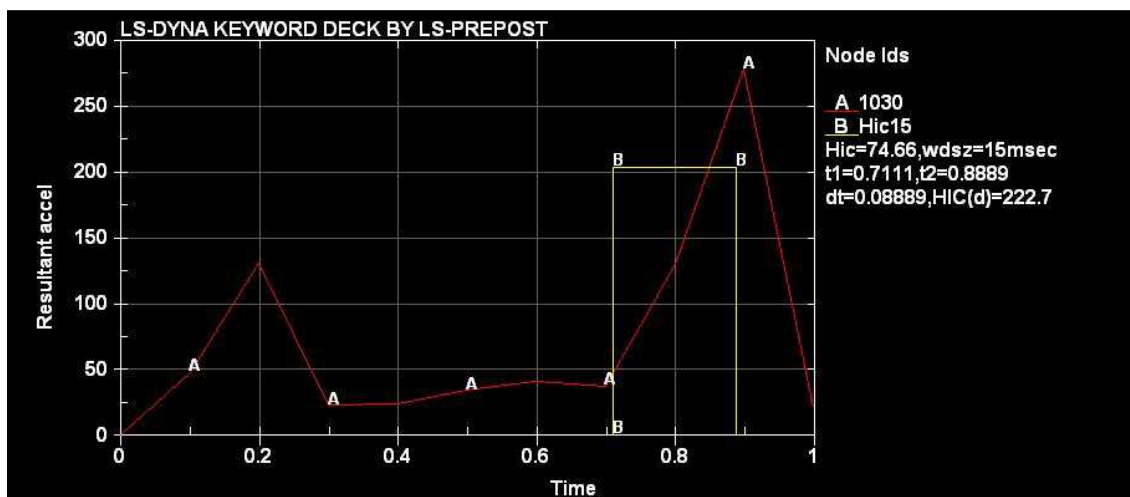


Figura 7.14. Impacto adulto 4B

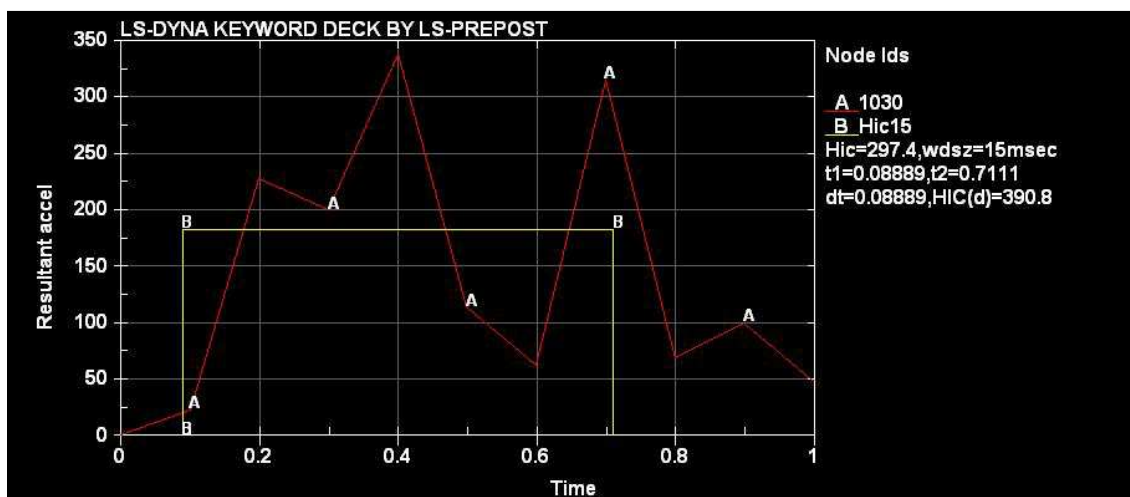


Figura 7.15. Impacto adulto 4C

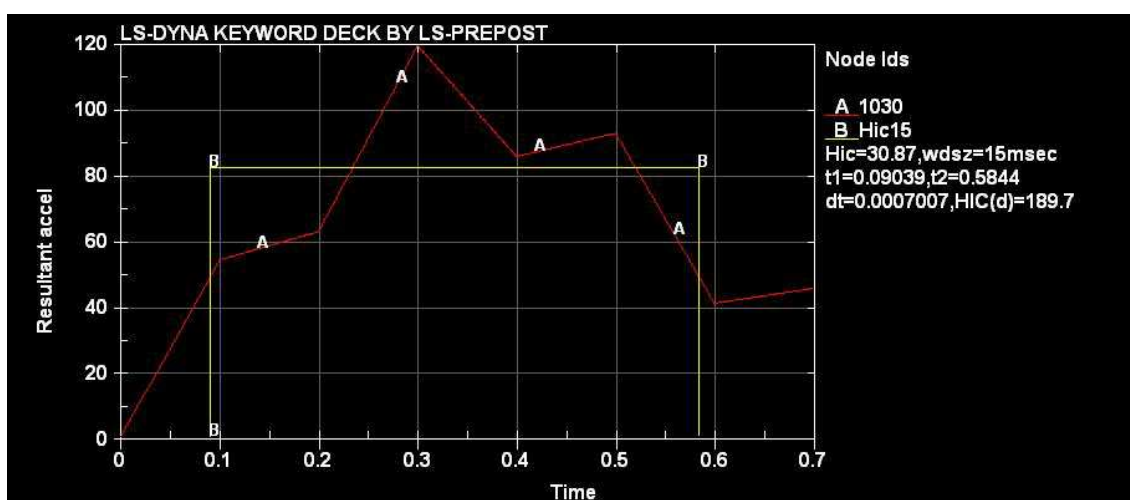


Figura 7.16. Impacto adulto 4D

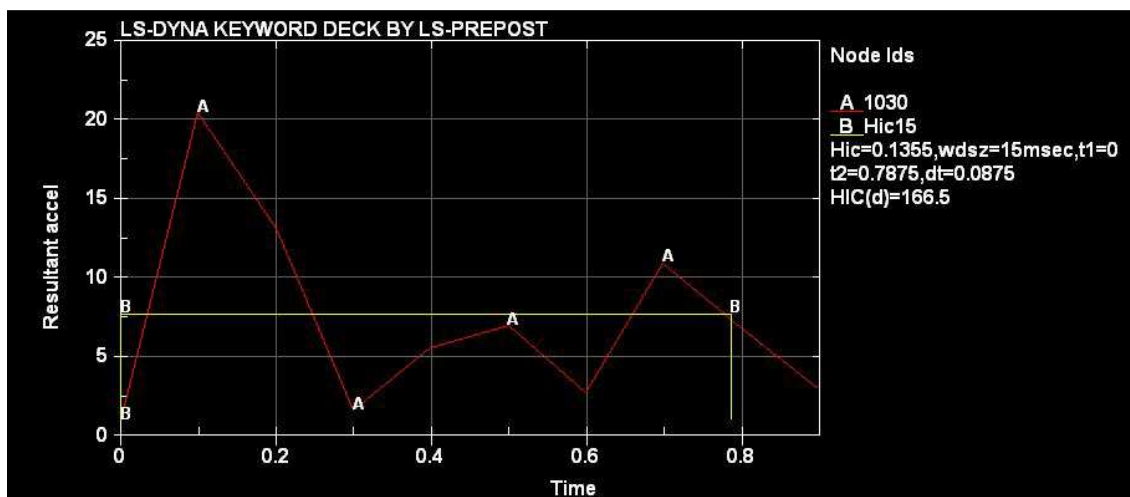


Figura 7.17. Impacto adulto 5A

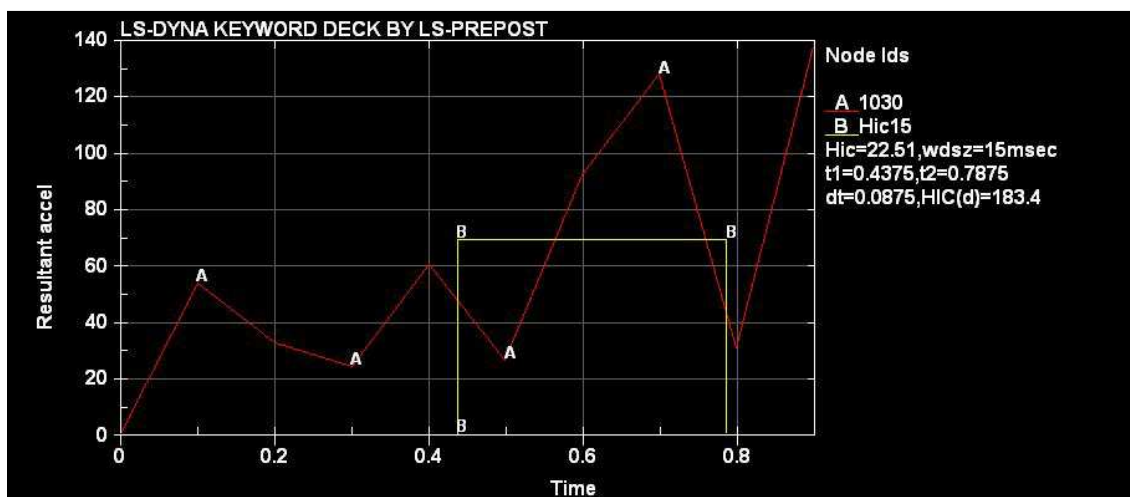


Figura 7.18. Impacto adulto 5B

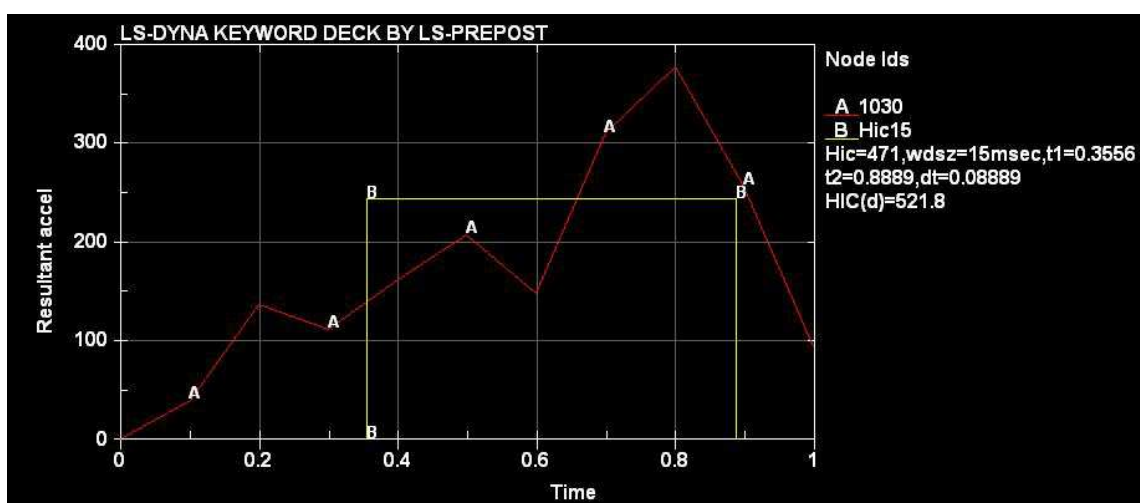


Figura 7.19. Impacto adulto 5C

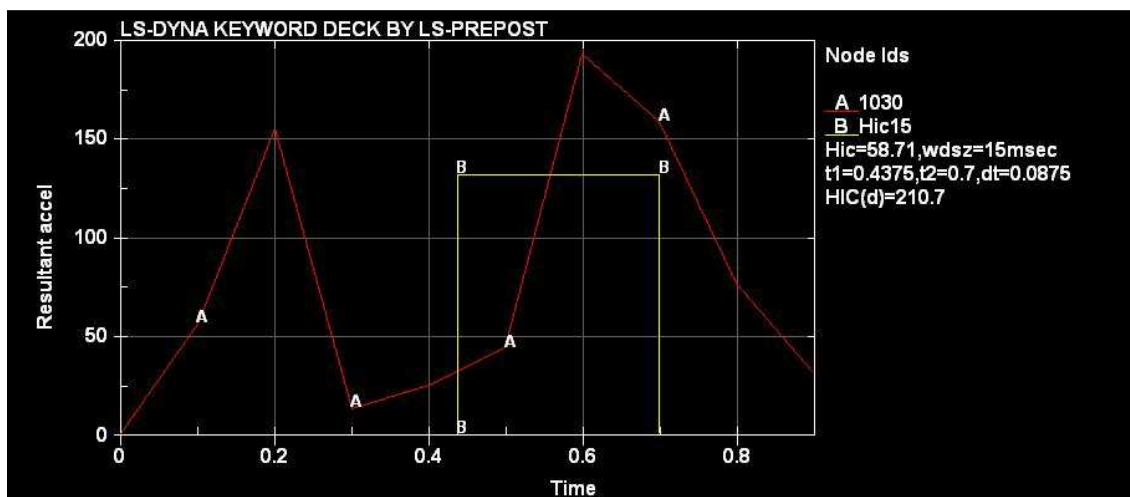


Figura 7.20. Impacto adulto 5D

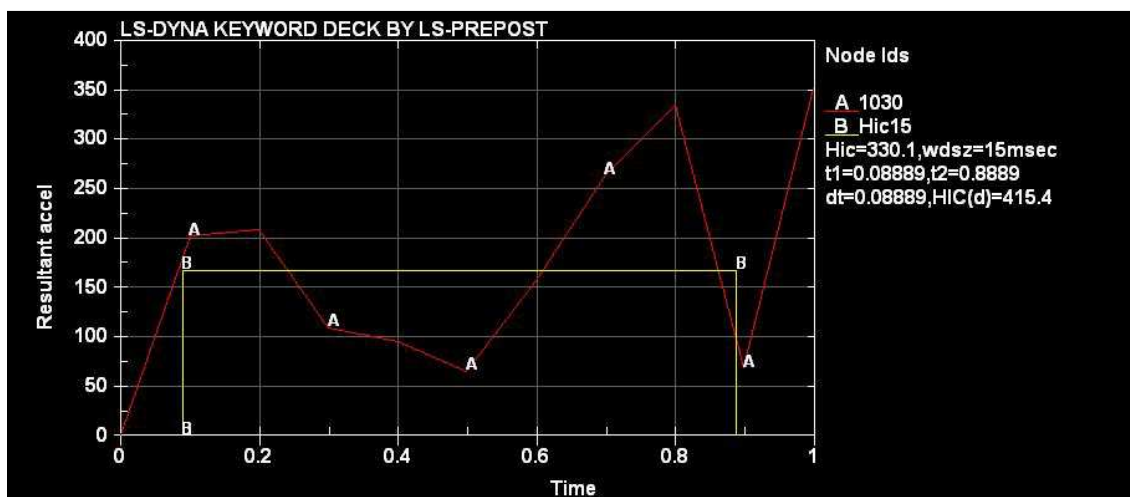


Figura 7.21. Impacto adulto 6A

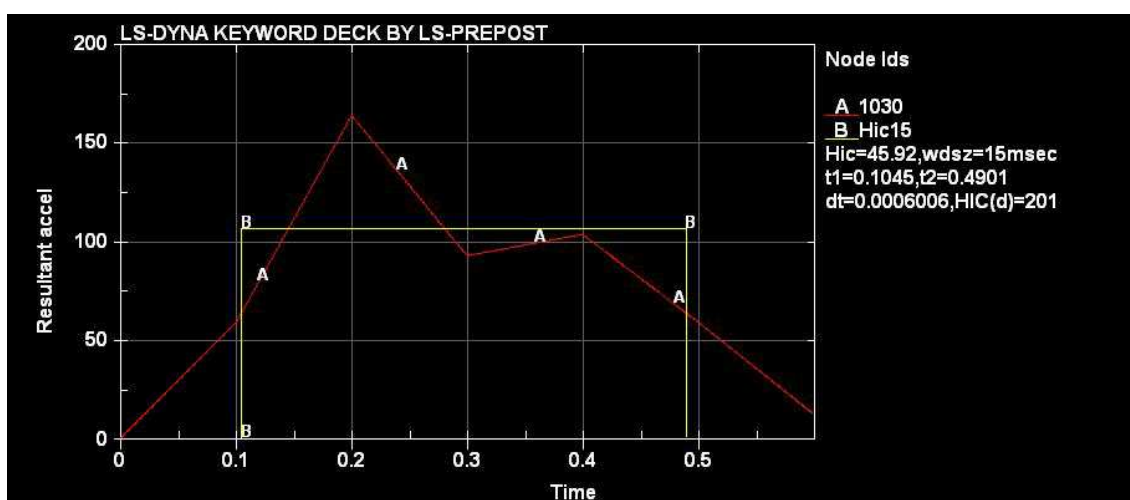


Figura 7.22. Impacto adulto 6B

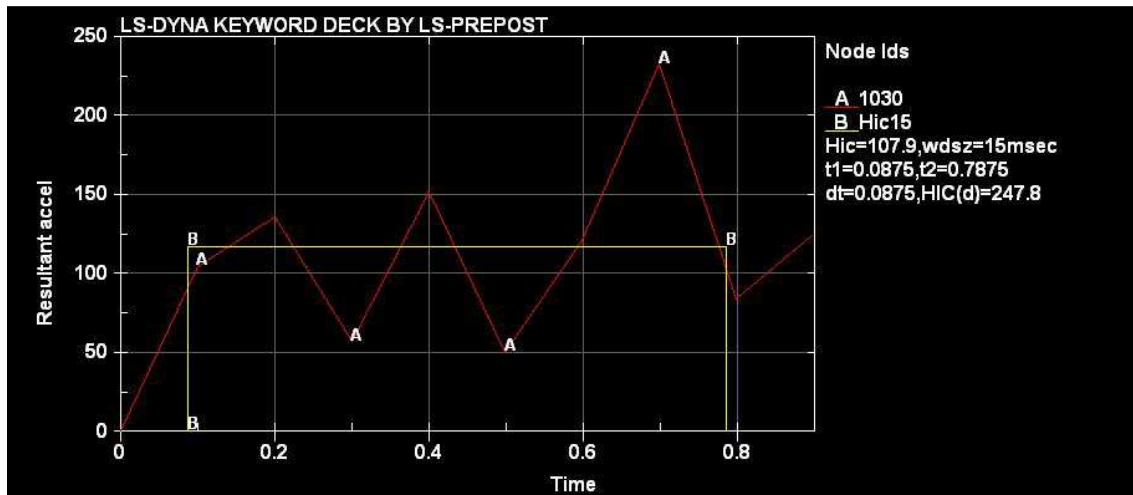


Figura 7.23. Impacto adulto 6C

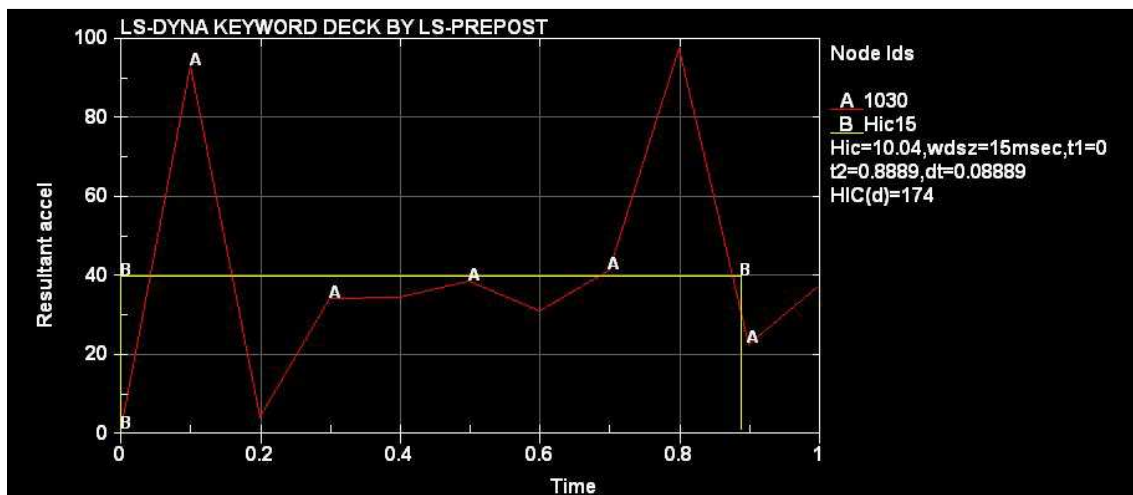


Figura 7.24. Impacto adulto 6D

7.2 Niño

Las figuras 7.25 a 7.48 muestran los resultados obtenidos en las simulaciones para los casos de ensayo con el impactador de niño.

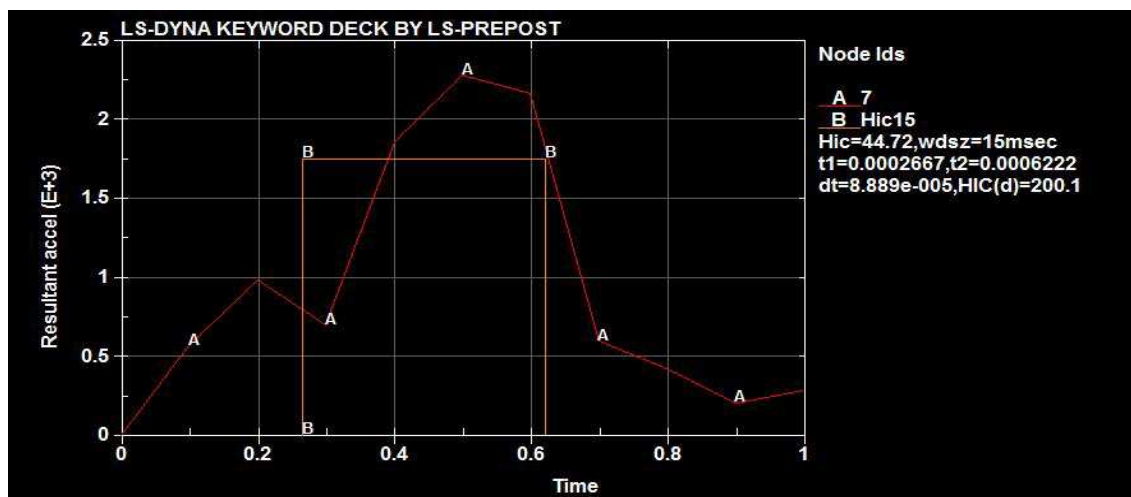


Figura 7.25. Impacto niño 1A

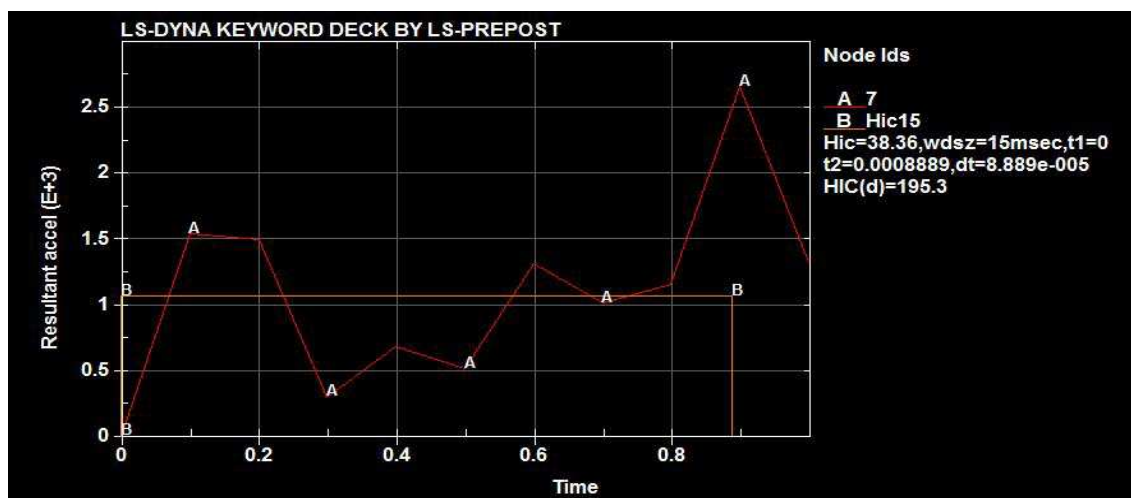


Figura 7.26. Impacto niño 1B

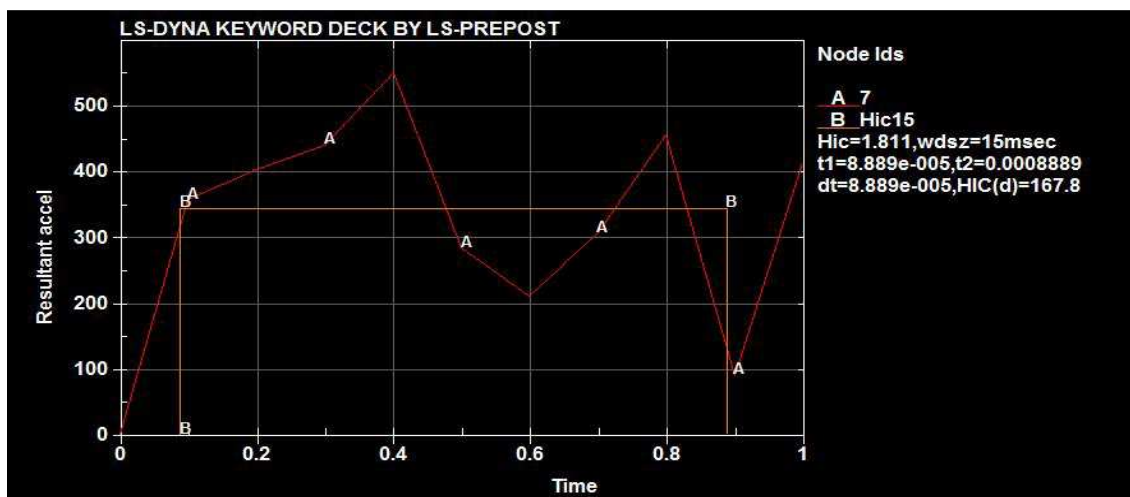


Figura 7.27. Impacto niño 1C

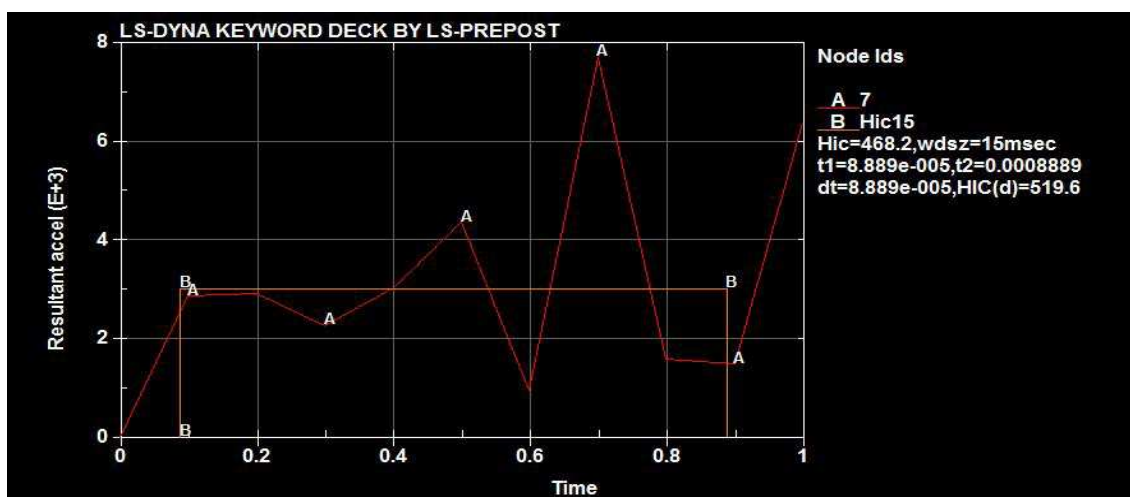


Figura 7.28. Impacto niño 1D

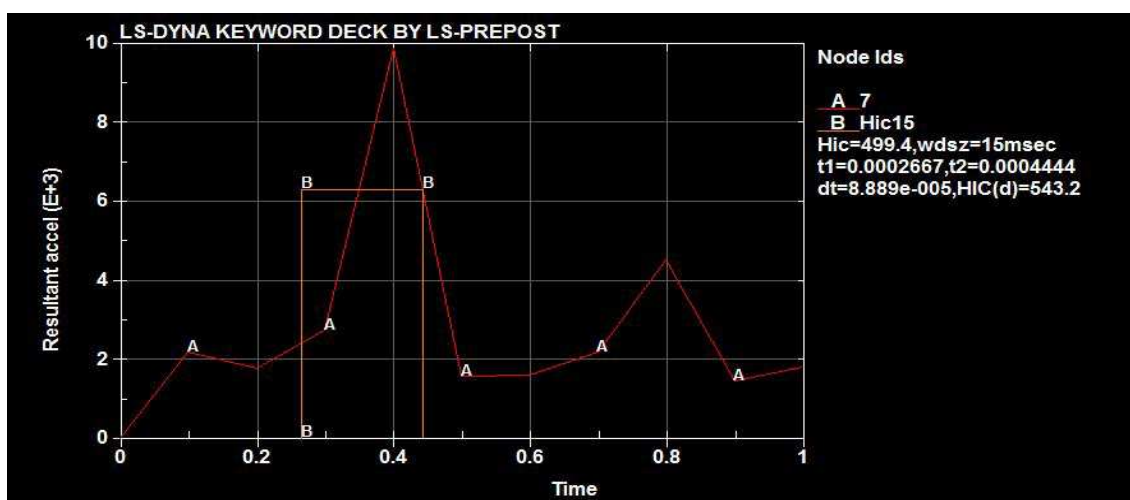


Figura 7.29. Impacto niño 2A

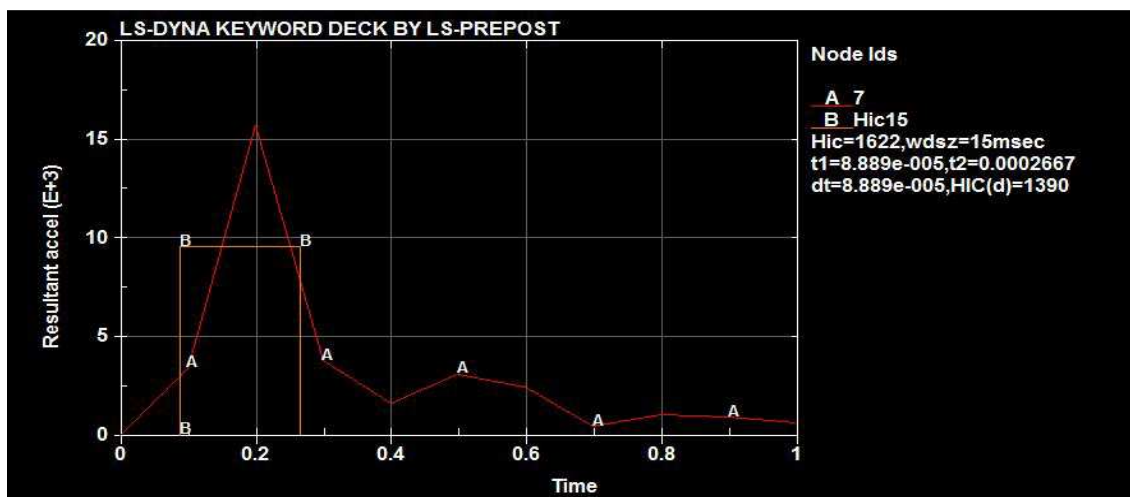


Figura 7.30. Impacto niño 2B

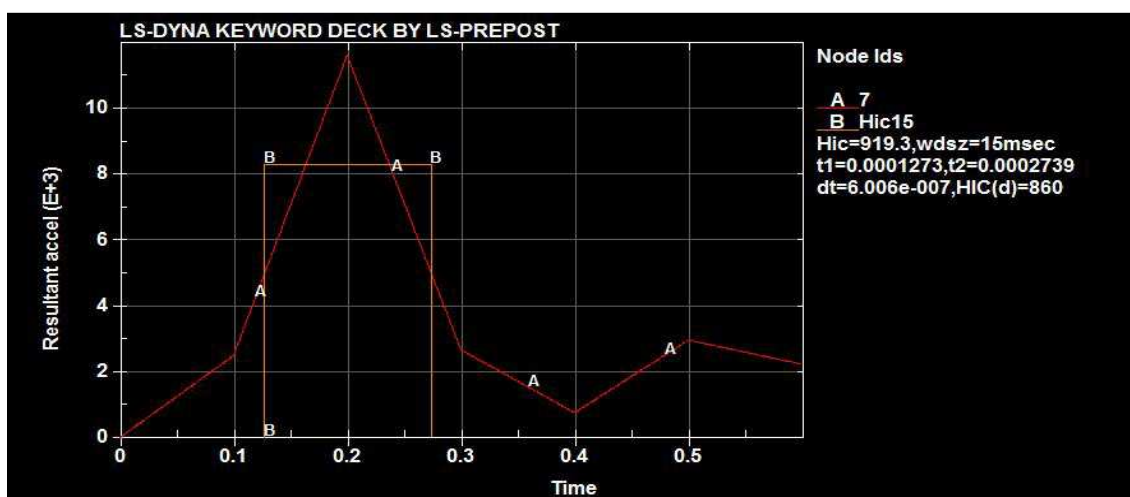


Figura 7.31. Impacto niño 2C

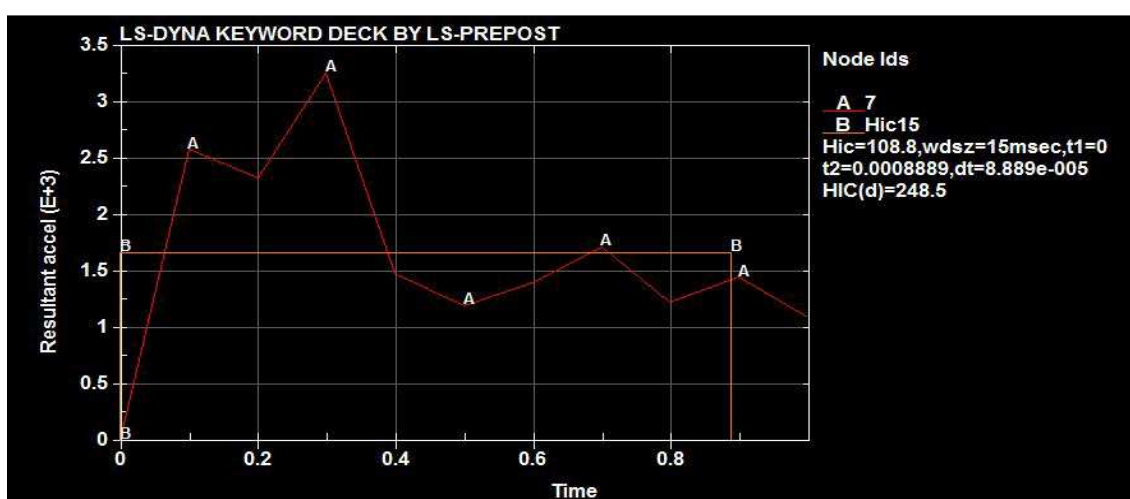


Figura 7.32. Impacto niño 2D

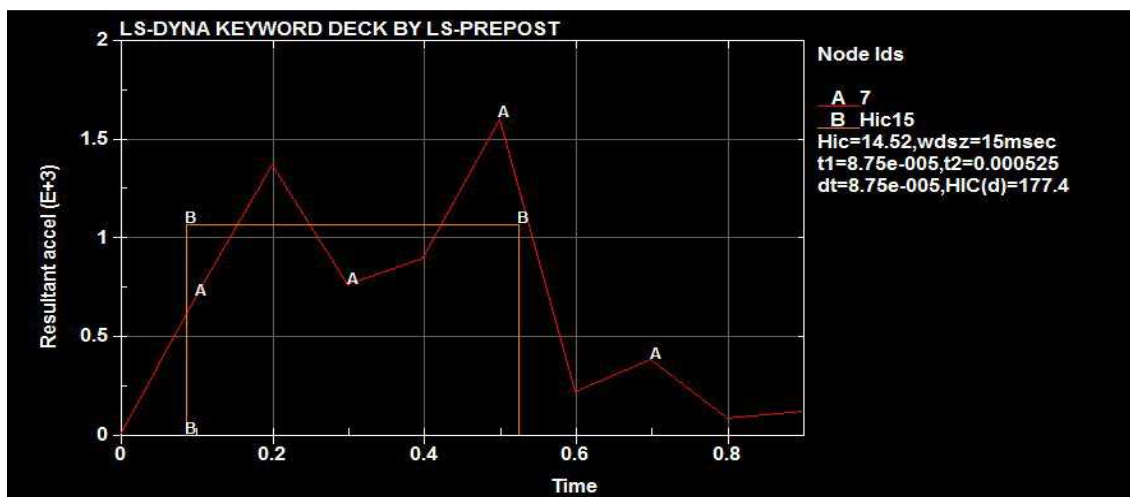


Figura 7.33. Impacto niño 3A

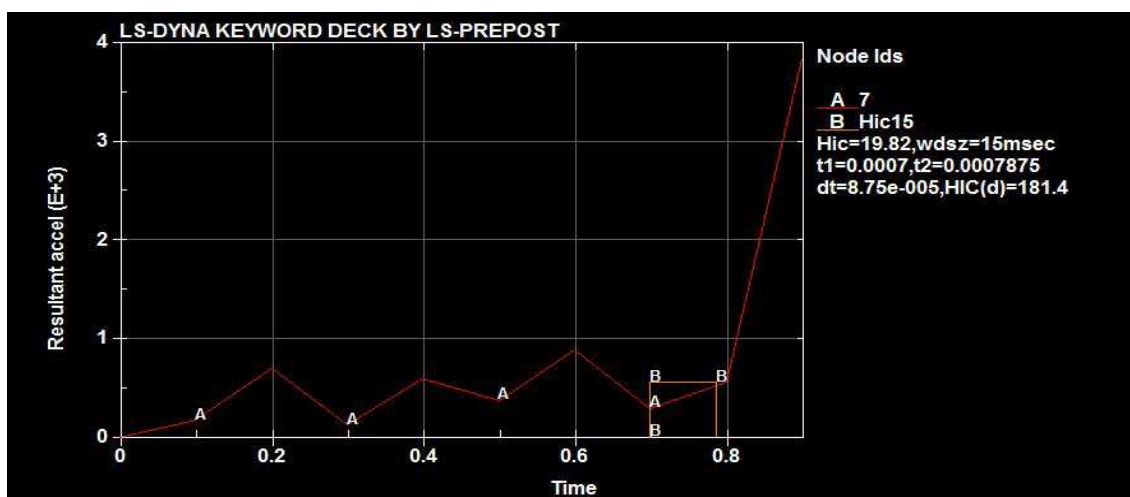


Figura 7.34. Impacto niño 3B

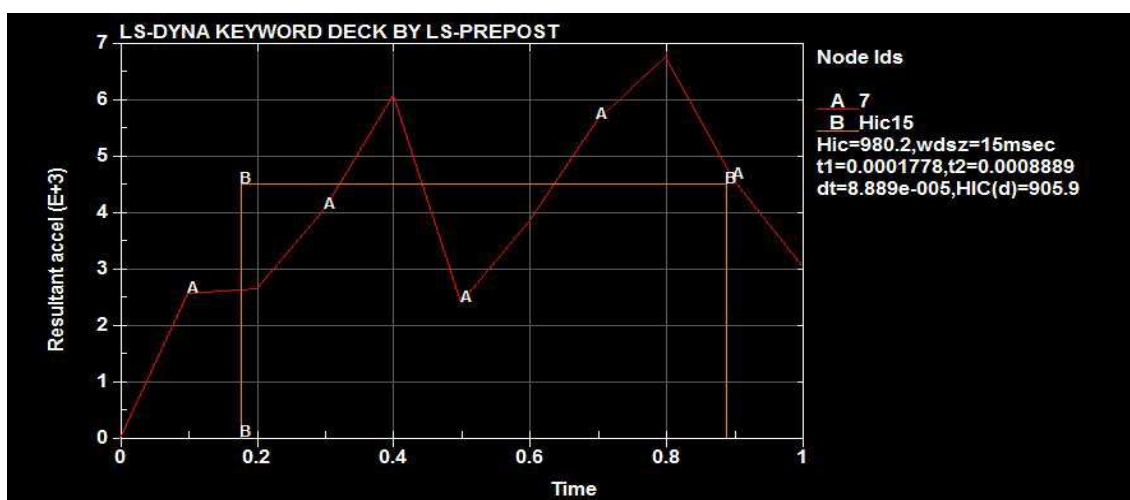


Figura 7.35. Impacto niño 3C

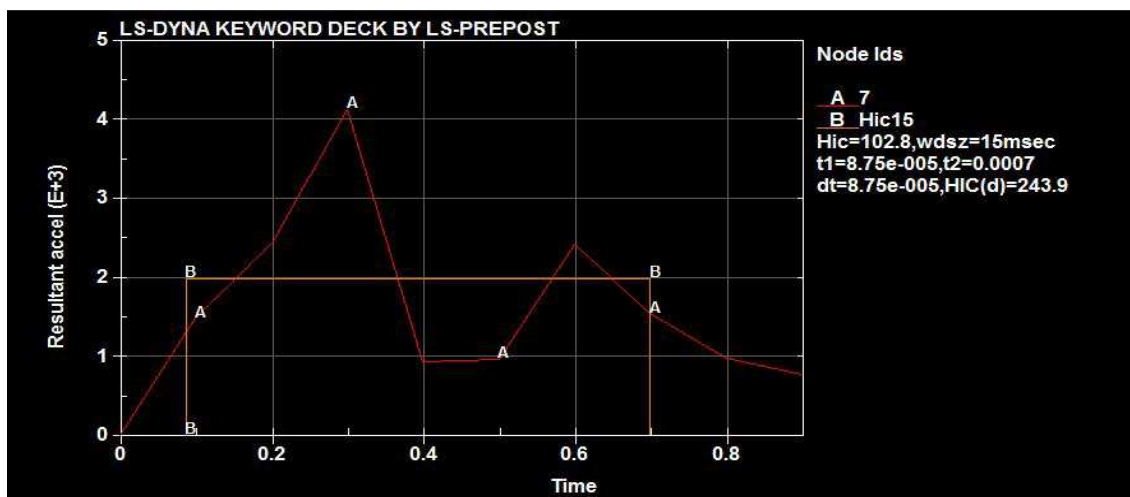


Figura 7.36. Impacto niño 3D

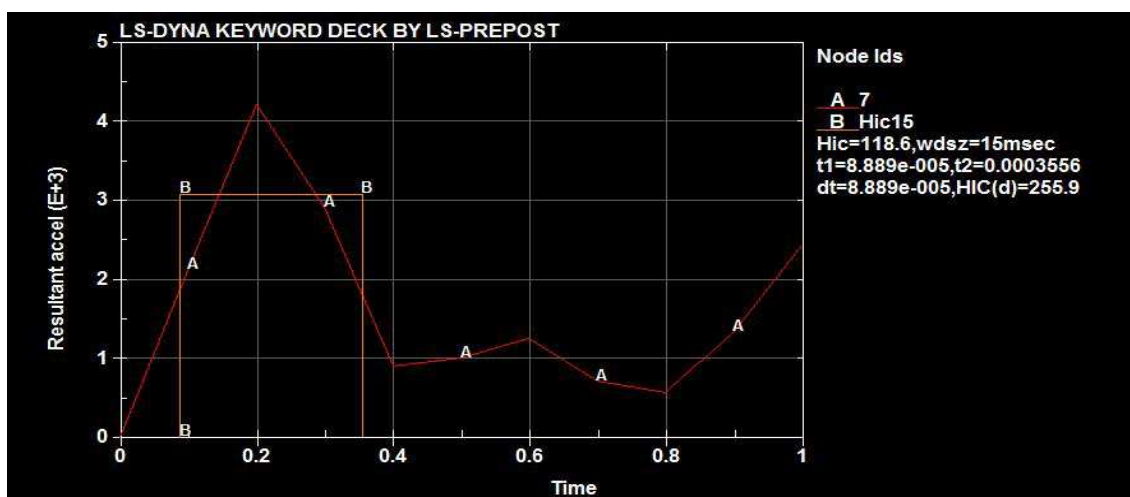


Figura 7.37. Impacto niño 4A

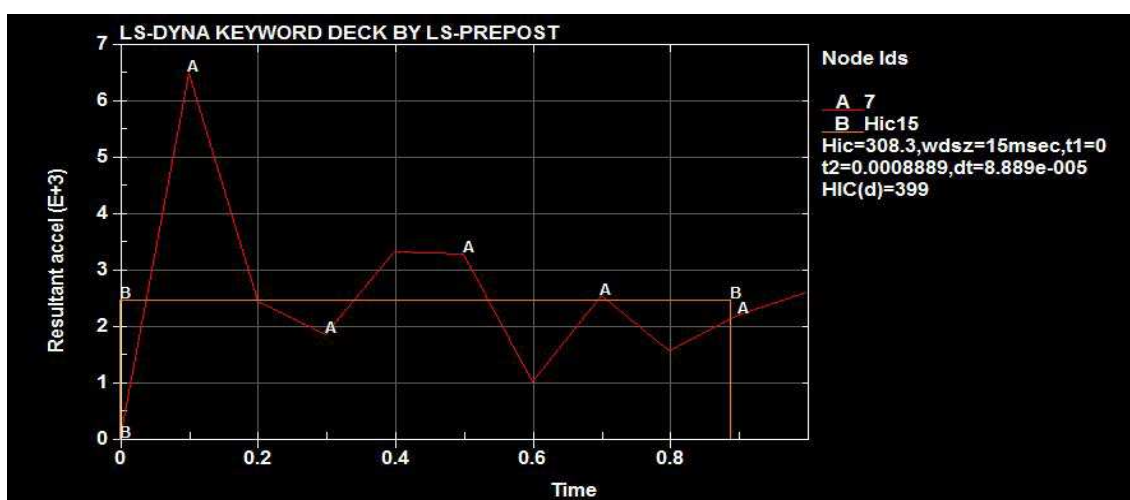


Figura 7.38. Impacto niño 4B

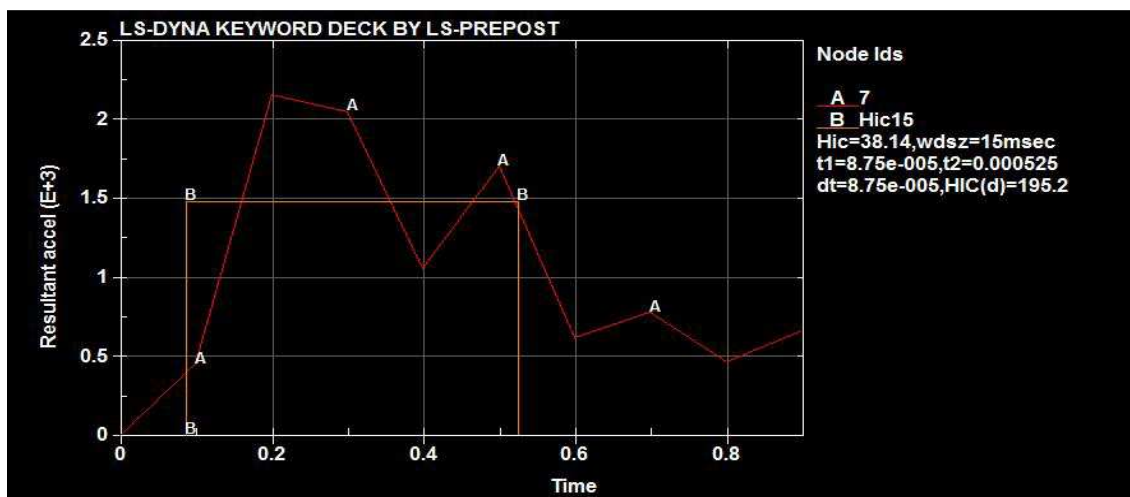


Figura 7.39. Impacto niño 4C

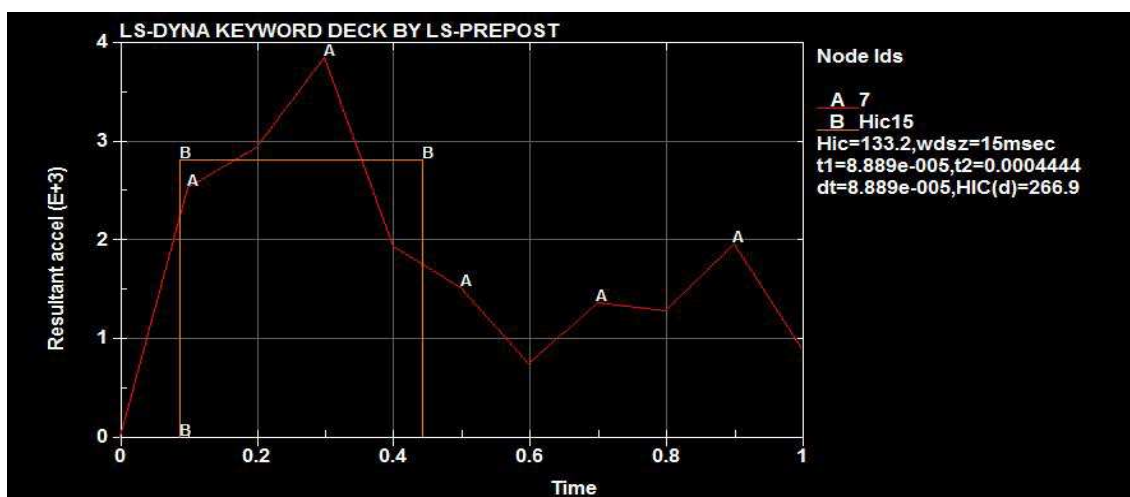


Figura 7.40. Impacto niño 4D

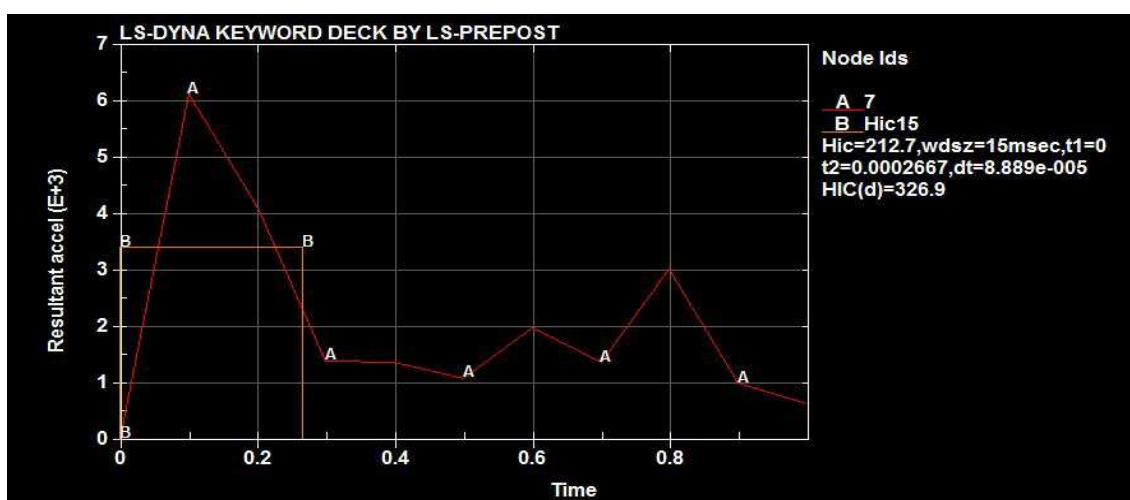


Figura 7.41. Impacto niño 5A

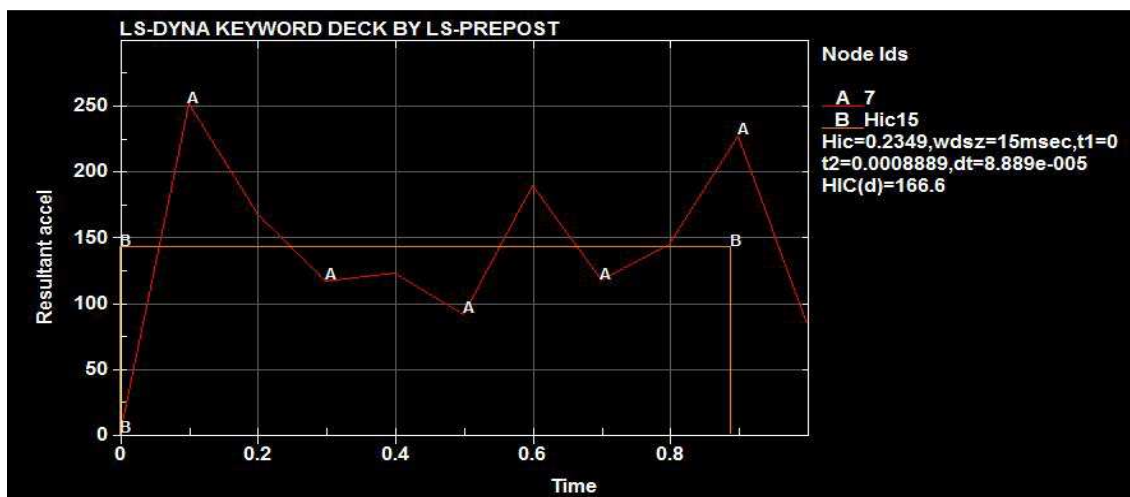


Figura 7.42. Impacto niño 5B

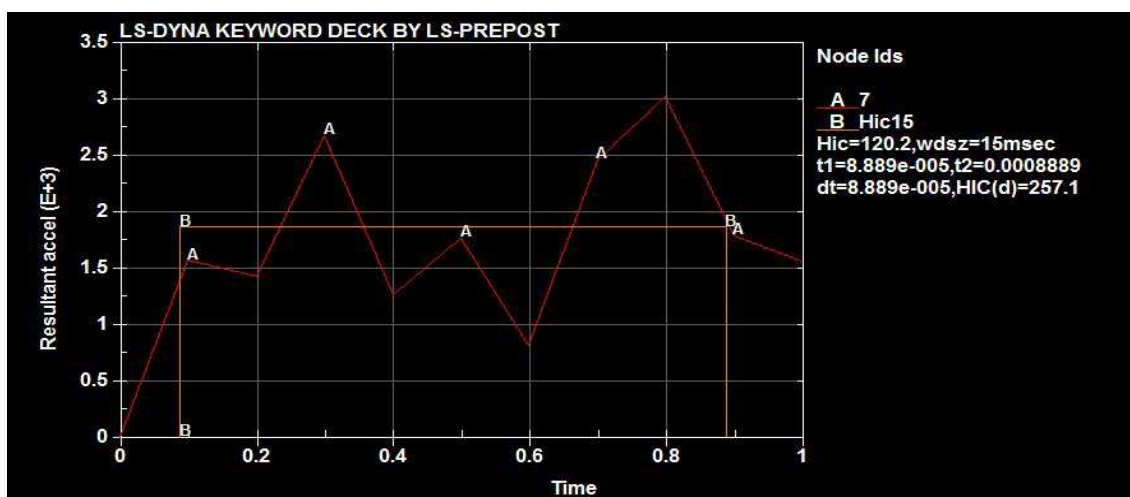


Figura 7.43. Impacto niño 5C

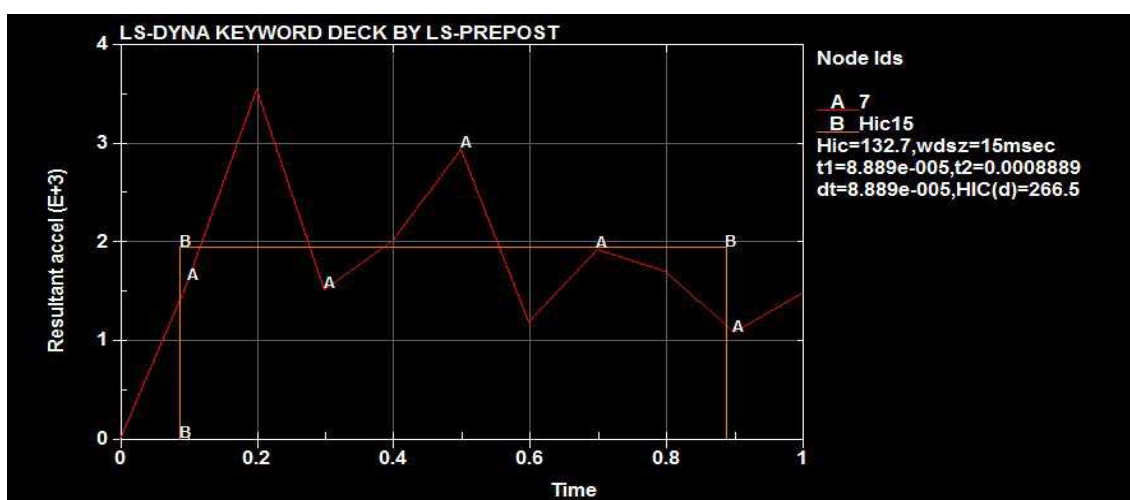


Figura 7.44. Impacto niño 5D

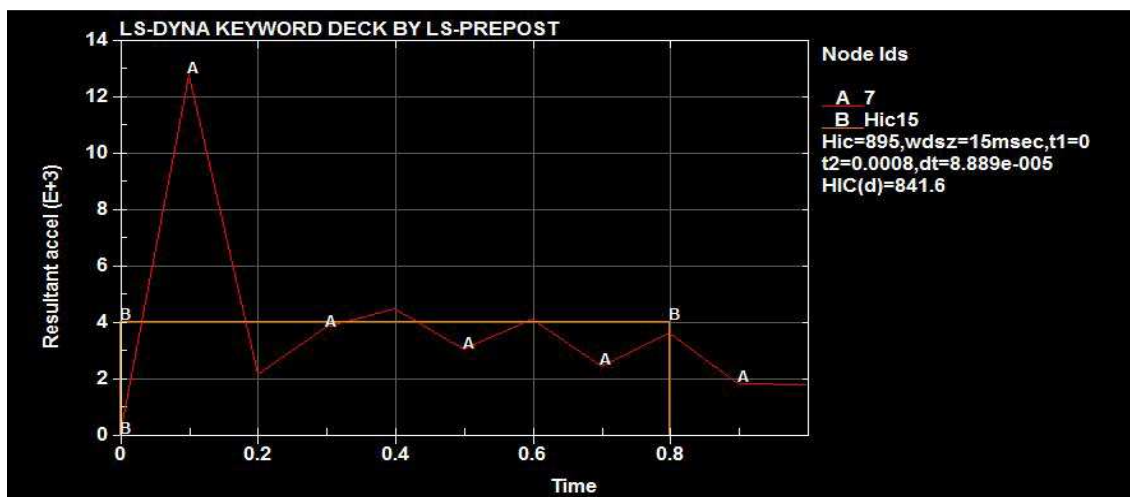


Figura 7.45. Impacto niño 6A

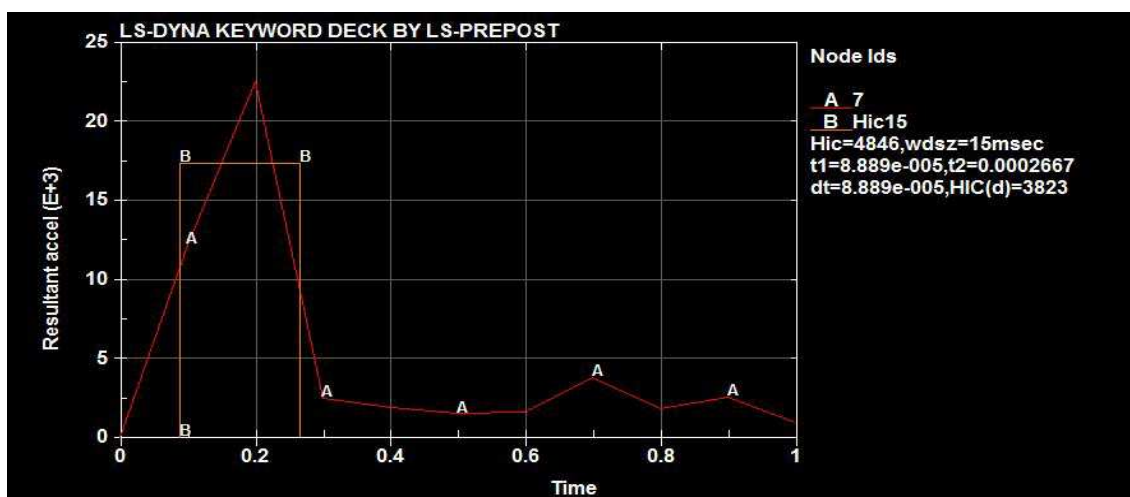


Figura 7.46. Impacto niño 6B

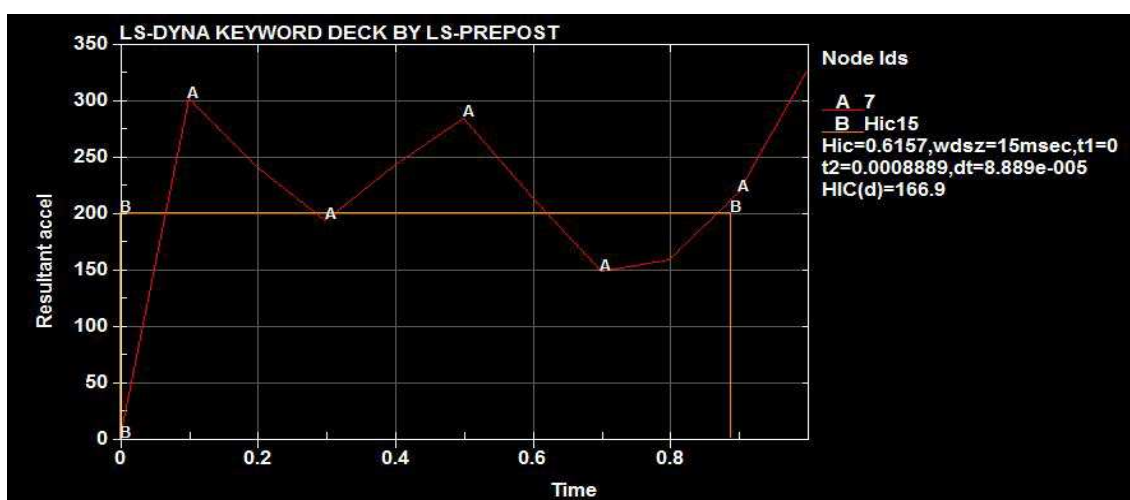


Figura 7.47. Impacto niño 6C

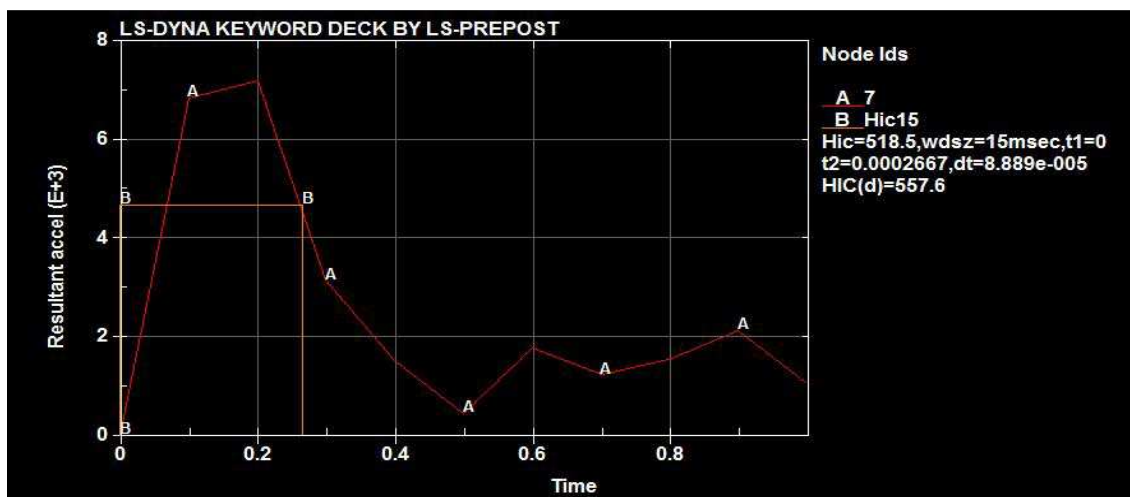


Figura 7.48. Impacto niño 6D

7.3 Análisis de los resultados

Los anteriores resultados quedan resumidos en las tabla 7.1:

Tabla 7.1. Valores HIC

	NIÑO	ADULTO
1A	200,10	242,80
1B	195,30	233,70
1C	167,80	173,60
1D	519,60	202,60
2A	543,20	183,00
2B	1.390,00	177,10
2C	860,00	405,10
2D	248,50	168,00
3A	177,40	188,20
3B	181,40	222,00
3C	905,90	262,60
3D	243,90	285,70
4A	255,90	169,40
4B	399,00	222,70
4C	195,20	390,80

4D	266,90	189,70
5A	326,90	166,50
5B	166,60	183,40
5C	257,10	521,80
5D	266,50	210,70
6A	841,60	415,40
6B	3.823,00	201,00
6C	166,90	247,80
6D	557,60	174,00
PROMEDIO	548,18	243,23
MÁXIMO	3.823,00	521,80
MÍNIMO	166,60	166,50

Las tablas 7.2 y 7.3 muestran los resultados obtenidos posicionados en los respectivos sectores en los que se han ensayado.

ADULTO											
242,80	233,70	183,00	177,10	188,20	222,00	169,40	222,70	166,50	183,40	415,40	201,00
173,60	202,60	405,10	168,00	262,60	285,70	390,80	189,70	521,80	210,70	247,80	174,00

Tabla 7.2. Resultados HIC adulto posicionados

NIÑO											
200,10	195,30	543,20	1.390,00	177,40	181,40	255,90	399,00	326,90	166,60	841,60	3.823,00
167,80	519,60	860,00	248,50	905,90	243,90	195,20	266,90	257,10	266,50	166,90	557,60

Tabla 7.3. Resultados HIC niño posicionados

Las tablas 7.4 y 7.5 muestran los resultados obtenidos posicionados y con su respectiva valoración por colores según el protocolo de EuroNCAP.

ADULTO											
242,80	233,70	183,00	177,10	188,20	222,00	169,40	222,70	166,50	183,40	415,40	201,00
173,60	202,60	405,10	168,00	262,60	285,70	390,80	189,70	521,80	210,70	247,80	174,00

Tabla 7.4. Valoración HIC adulto

NIÑO											
200,10	195,30	543,20	1.390,00	177,40	181,40	255,90	399,00	326,90	166,60	841,60	3.823,00
167,80	519,60	860,00	248,50	905,90	243,90	195,20	266,90	257,10	266,50	166,90	557,60

Tabla 7.5. Valoración HIC niño

En la figura 7.49 quedan reflejados los resultados obtenidos sobre el capó y el parabrisas del vehículo ensayado.

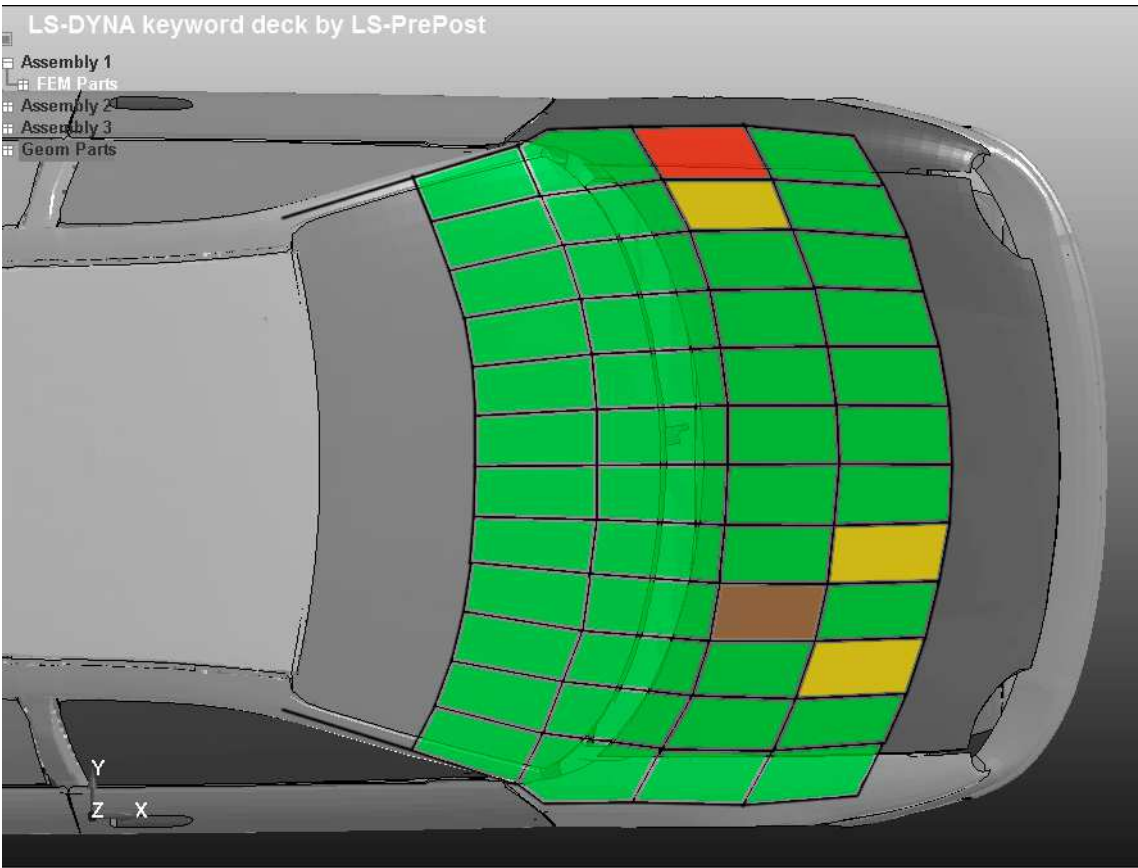


Figura 7.49. Distribución de resultados sobre el capó y parabrisas

Con estos valores obtenidos, y de acuerdo a lo especificado en el punto 6.5 con respecto a la valoración se obtiene:

- Nº de ensayos realizados: 48
- Verde: 43 X 1 43 puntos

-	Amarillo:	3	X	0.75	2.25 puntos
-	Naranja:	0	X	0.5	0 puntos
-	Marrón:	1	X	0.25	0.25 puntos
-	Rojo:	1	X	0	0 puntos

Obteniendo un total de 45.5 puntos.

Al haber 48 puntos ensayados: $45.5/48 = 94.79\%$

La puntuación máxima posible en este tipo es de 24 puntos, por lo que en nuestro caso, la puntuación final será del 94.79% de 24, resultando:

Puntuación final: 22.75 puntos de valoración euroNCAP.

Cabe destacar que, como se explicó en el punto 6.5, a las valoraciones obtenidas hay que aplicarles un factor de corrección obtenido a su vez del factor entre los resultados obtenidos en los ensayos y las predicciones del fabricante. En este caso esa corrección no se ha tenido en cuenta, ya que no se dispone de los datos aportados por el fabricante a euroNCAP.

8 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 Conclusiones

Los protocolos desarrollados por euroNCAP, con base en la reglamentación dictada por el Parlamento Europeo, demuestran ser muy efectivos, aunque dentro de unas limitaciones lógicas, ya que resulta prácticamente imposible adecuar las infinitas variaciones que pueden acontecer en el trascurso de un accidente.

Pese a estas limitaciones, los ensayos estandarizados para unas circunstancias concretas, demuestran ser efectivos en la medida de que consiguen comparativas precisas entre diferentes vehículos, instando a los fabricantes a mejorar continuamente sus elementos de seguridad.

Las simulaciones de impacto mediante LS-DYNA suponen una gran herramienta a la hora de investigar la seguridad de los vehículos, evaluando posibles daños, tanto en el vehículo, como en sus ocupantes, así como en los peatones, como es el caso de este proyecto. Sin embargo, el desarrollo de los modelos distintos vehículos conlleva un arduo trabajo. Además, las simulaciones requieren una potencia de cálculo elevada y unos tiempos de ejecución muy elevados.

A la luz de los resultados obtenidos, podría decirse que las simulaciones con modelos simplificados aportan unos valores lógicos respecto a los que podrían obtenerse con ensayos reales, o con simulaciones realizadas con los modelos completos.

Este tipo de simulaciones podría facilitar en gran medida el trabajo de los ingenieros encargados de realizarlas, ya que simplifica en gran medida los trabajos a realizar, sobre todo reduciendo de manera destacable la capacidad de cálculo necesaria y el tiempo empleado en cada simulación. Reducir los tiempos de cálculo puede suponer un incremento en la efectividad de este tipo de pruebas, ya que se podrían reproducir más situaciones y condiciones además de las ya establecidas por los protocolos.

Es necesario apuntar también como conclusión, que el sistema de modelos simplificados, solamente debería aplicarse en algunos tipos de ensayos, ya que solo tendría beneficios reales en aquellos ensayos en los que intervienen una serie limitada de elementos del vehículo.

Por último, a modo de resumen de estas conclusiones, se puede reseñar la validez de la metodología empleada como un sistema aproximado, sencillo y más rápido de desarrollar. También se hace evidente la necesidad de ampliar la investigación con estudios similares y cotejar los resultados obtenidos para validar la metodología empleada como un sistema preciso, lo que supone la apertura de una amplia línea de investigación.

8.2 Trabajos futuros

En primer lugar, y de manera destacada, pese a que el presente proyecto se concluye dando como válido el empleo de modelos simplificados, habría que ampliar en gran medida el estudio de casos en los que se podrían emplear modelos simplificados. Para poder validar completamente este sistema, habría que cotejar los resultados obtenidos en este proyecto, y en otros estudios similares, con los que se obtendrían al realizar las simulaciones con modelos completos.

Uno de los aspectos más atractivos de este proyecto es la amplia gama de posibilidades que se abren como posibilidades de investigación futura.

La primera de estas investigaciones, debería ser la comparativa de los resultados obtenidos en este proyecto, con los resultados obtenidos en los ensayos reales. Si bien esta línea de investigación es bastante improbable, ya que el vehículo utilizado no se fabrica en la actualidad y euroNCAP se dedica a la evaluación de vehículos nuevos, sí que podrían compararse con los resultados obtenidos haciendo las simulaciones con el modelo de vehículo completo.

Siguiendo esta línea de investigación, estas mismas comparativas se podrían repetir con modelos diferentes de vehículos, estudiando la viabilidad de estas simulaciones con modelos reducidos en cada tipo de vehículo.

Una vez se hayan desarrollado varias investigaciones y comparativas entre modelos completos y modelos simplificados, podría estudiarse la posibilidad de establecer una relación entre los resultados entre unos y otros, ya que por supuesto, y aunque no ha sido el fin de este proyecto investigar este punto, cabe la posibilidad de que haya una diferencia considerable en los resultados. Establecer una relación entre los resultados obtenidos con modelos completos y simplificados podría suponer una mejora considerable en la efectividad y productividad a la hora de trabajar con simulaciones de este tipo.

Esta línea de investigaciones se abre aún más si se extiende más allá del ámbito de los ensayos con los impactadores de cabeza, e incluyendo al resto de test realizados por euroNCAP. Para algunos de estos test, es realmente complicado establecer un sistema de modelos simplificados, ya que por lo general intervienen la mayoría de los elementos del vehículo. Sin embargo, en los test de protección del peatón, sí que sería más fácil establecer este tipo de modelos, ya que se podría interpretar que en este tipo de accidentes intervienen un número limitado de elementos.

Por último, y aunque puede ser una línea de investigación más compleja, este tipo de simulaciones con modelos simplificados, podrían utilizarse para ayudar a desarrollar nuevos modelos de impactadores más complejos para las simulaciones. Lo que se intenta evaluar en este tipo de test es el daño que se produce en el peatón, por lo que se podrían desarrollar impactadores más realistas, con la forma y características de una rodilla o una cabeza real por ejemplo.

9 REFERENCIAS

- [1] Dirección General de Tráfico, *Anuario estadístico de accidentes 2013*, disponible en <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-accidentes/>. Marzo 2015.
- [2] EuroNCAP, www.euroncap.com. Marzo 2015.
- [3] EuronNCAP, *Pedestrian Testing Protocol version 4.3*, febrero 2009, disponible en <http://www.euroncap.com/es/para-ingenieros/protocols/pedestrian-protection/> Febrero 2011.
- [4] LS-DYNA, www.lstc.com/products/ls-dyna. Marzo 2015.
- [5] Pablo Luque Rodríguez y Daniel Álvarez Mántaras, *Investigación de accidentes de tráfico. Estudio del automóvil*. Universidad de Oviedo.
- [6] Dirección General de Tráfico, *Funcionamiento y elementos del ABS*, disponible en <http://www.dgt.es/es/sistemas-seguridad-vehiculos/sistema-antibloqueo-frenos/funcionamiento-y-elementos-del-ABS.shtml>. Marzo 2015.

- [7] José Font Mezquita, Juan F. Dols Ruiz y Juan F Dols Ruiz, *Tratado sobre automóviles. Tecnología del automóvil*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [8] Eduardo Águeda Casado *Elementos estructurales del vehículo*, Paraninfo. 2009.
- [9] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), <http://www.nhtsa.gov/>. Marzo 2015.
- [10] Juan Tomás Celigüeta Lizarza, *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*, marzo2011, disponible en [www.unav.es/adi/UserFiles/File/80980339/Elementos%20Finitos\(1\).pdf](http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/80980339/Elementos%20Finitos(1).pdf). Abril 2014.
- [11] Rubén Escudero Melendo, *Estudio del impacto de un vehículo sobre barreras de seguridad mediante LS-DYNA*. Junio 2010
- [12] Alberto Pavón Zori, *Simulación de un choque lateral contra barrera deformable y contra un poste*. Octubre 2011.
- [13] A. Carnicero. *Introducción al método de los elementos finitos*. 2011, disponible en www.iit.upcomillas.es/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf. Abril 2014.
- [14] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Theoretical Manual, mayo 2008, disponible en http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf. Febrero 2011.
- [15] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA keyword user Manual, junio 2009, disponible en http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Vol_I.pdf. Febrero 2011.
- [16] Comisión Europea, EC Nº 631/2009, 2009
- [17] European Enhanced Vehicle-safety Committee, *European Enhanced Vehicle-safety Committee Working Group 17 Report*, diciembre 1998.
- [18] National Crash Analysis Center (NCAC), www.ncac.gwu.edu. Marzo 2015.

[19] National Crash Analysis Center (NCAC), Finite Element Model of Dodge Neon, 1996 version 7, disponible en www.ncac.gwu.edu/vml/archive/ncac/vehicle/neon-0.7.pdf. Febrero 2011.

[20] National Crash Analysis Center (NCAC), Finite Element Model of Dodge Neon, 1996 version 7, modelo de elementos finitos disponible en www.ncac.gwu.edu/vml/archive/ncac/vehicle/neon-0.7.tgz. Febrero 2011

[21] Revista Autocasion, Tipos de aceros empleados en las carrocerías y su reparabilidad, disponible en <http://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/111113/tipos-de-aceros-en-las-carrocerias/>. Marzo 2015.